



**TUGAS AKHIR - TM 095502**

**RE-DESIGN *HIGH PRESSURE HEATER* (HPH) 5  
UNIT 1 DI PT. PJB. UP GRESIK  
MENGUNAKAN ANALISIS TERMODINAMIKA  
DAN PERPINDAHAN PANAS**

**NADIA PARWATY WIJANARKO  
NRP. 2114 030 047**

**Dosen Pembimbing:  
Ir. Joko Sarsetiyanto, M.T.**

**Program Studi Diploma III  
Departemen Teknik Mesin Industri  
Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**



**TUGAS AKHIR - TM 095502**

**RE-DESIGN *HIGH PRESSURE HEATER* (HPH) 5  
UNIT 1 DI PT. PJB UP. GRESIK  
MENGUNAKAN ANALISIS TERMODINAMIKA  
DAN PERPINDAHAN PANAS**

**NADIA PARWATY WIJANARKO  
NRP 2114 030 047**

**Dosen Pembimbing:  
Ir. Joko Sarsetiyanto, M.T.**

**Program Studi Diploma III  
Departemen Teknik Mesin Industri  
Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**



**TUGAS AKHIR - TM 095502**

**RE-DESIGN *HIGH PRESSURE HEATER* (HPH) 5  
UNIT 1 AT PT. PJB UP GRESIK USING  
THERMODYNAMICS AND HEAT TRANSFER  
ANALYSIS**

**NADIA PARWATY WIJANARKO  
NRP 2114 030 047**

**Counselor Lecturer:  
Ir. Joko Sarsetiyanto, M.T.**

**Study Program of Diploma III  
Industrial Mechanical Engineering Department  
Faculty of Vocational  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan berkah petunjuk, hidayah, dan karuniaNya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.

Tugas Akhir ini merupakan persyaratan untuk memperoleh gelar Ahli Madya bidang studi Konversi Energi, Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, tentunya tak luput dari dukungan dan bantuan oleh berbagai pihak baik secara moril maupun materil. Maka dari itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua, Bapak Eko Agus Widjanarko, S.H., M.M., serta Ibu Rukmi Parwati yang tidak henti-hentinya memberikan perhatian, kasih sayang, nasihat, serta doa kepada penulis sehingga penulis bisa berada pada tahap seperti ini.
2. Bapak Ir. Joko Sarsetiyanto M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, masukan serta meluangkan waktu untuk penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Denny M.E. Soedjono, M.T., selaku dosen wali penulis selama 6 semester.
4. Bapak Dr. Ir Heru Mirmanto, M.T., selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS.
5. Bapak Ir. Suhariyanto, M.T., selaku Koordinator Tugas Akhir sekaligus Koordinator Kerja Praktek.
6. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmu kepada penulis baik akademik maupun non akademik serta seluruh karyawan yang telah membantu selama penulis berada di Departemen Teknik Mesin Industri.
7. Kakakku satu-satunya yaitu Diastian Vinaya Wijanarko, S.T., M.T., yang udah ngebantu aku banget ngerjain

tugas- tugas kuliahku dan mengajariku kalo aku ga ngerti sama mata kuliahnya. Makasih banyak ya. Ndong S3!

8. Bapak Ali, Mas Bachtiar, Bapak Imam, Mbak Eci, Mas Uki, Mas Rahman, mbak dan mas yang di Rendal OP, serta bapak-bapak control room PLTU Unit 1 dan 2 PT. PJB UP. Gresik yang telah membantu penulis selama proses pengumpulan data Tugas Akhir.
9. Mbak Ocha, Anita Vizenza F.N. yang telah menjadi partner selama mencari data Tugas Akhir di PJB Gresik.
10. Septa dan Ismah yang telah menjadi teman selama masih maba hingga detik ini. Yang telah mendengar curhatan-curhatan penulis yang gak penting, kukukuk.
11. Semua anak bimbingan TA Pak Joko, tanpa kalian bisa-bisa aku ketinggalan info-info kalo mau ada asistensi.
12. Teman-teman D3MITS 2K14. Memang kita masuk bareng tapi gak semua bisa keluar bareng. Buat teman-teman yang belum lulus tetap semangat ya rek. Semoga ndang lulus, jangan molor lama-lama.
13. Adik-adik 2K15 yang sudah membantuku mengerjakan tugas salah satu mata kuliah di semester 6 ku. Makasih banyak rek udah bantu, maaf ngerepotin. Hehe.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

## **LEMBAR PENGESAHAN**

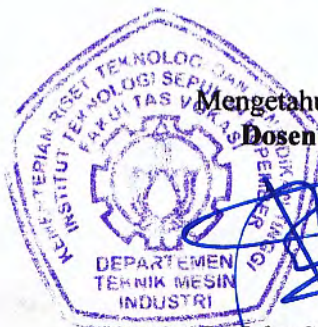
# **RE-DESIGN *HIGH PRESSURE HEATER* (HPH) 5 UNIT 1 DI PT. PJB UP GRESIK MENGGUNAKAN ANALISIS TERMODINAMIKA DAN PERPINDAHAN PANAS**

### **TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Ahli Madya  
pada  
Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi Diploma III Departemen Teknik Mesin Industri  
Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**NADIA PARWATY WIJANARKO**  
**NRP 2114 030 047**



Mengetahui dan Menyetujui  
**Dosen Pembimbing**

Ir. Joko Sarsetiyanto, M.T.  
NIP 19610602 198701 1 001

**SURABAYA, JULI 2017**

**RE-DESIGN HIGH PRESSURE HEATER  
(HPH) 5 UNIT 1 DI PT. PJB UP GRESIK  
MENGUNAKAN ANALISIS  
TERMODINAMIKA DAN  
PERPINDAHAN PANAS**

**Nama Mahasiswa : Nadia Parwaty Wijanarko**  
**NRP : 2114 030 047**  
**Departemen : Teknik Mesin Industri FV-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Ir. Joko Sarsetiyanto, M.T.**

***Abstrak***

*Pada PT. PJB UP. Gresik Unit 1 terdapat 5 feedwater heater, yaitu 2 low pressure heater (LPH), 2 high pressure heater (HPH), dan 1 deaerator. HPH yang ada di pembangkit ini yaitu HPH 4 dan HPH 5. Pada tugas akhir ini, heater yang akan di-re-design adalah HPH 5. HPH merupakan alat pemanas feedwater lanjut tekanan tinggi dengan menggunakan ekstraksi uap turbin sebagai media pemanasnya. Kerusakan yang sering terjadi pada HPH 5 adalah kebocoran tube dan keausan baffle. Kerusakan pada HPH 5 terus menerus berulang dapat mengurangi efektifitas dan performa dari HPH.*

*Re-design pada HPH 5 yaitu dengan melakukan analisis termodinamika terhadap HPH 5 sebagai control volume. Melakukan perhitungan perpindahan panas dengan metode LMTD untuk mendapatkan dimensi tiap zona. Perhitungan yang dilakukan yaitu menentukan panjang masing-masing tiap zona HPH, laju perpindahan panas, Overall Heat Transfer Coefficient (U), luas perpindahan panas (A), perhitungan pressure drop ( $\Delta P$ ) pada tube dan pada shell (untuk masing-masing zona yaitu zona desuperheating, zona condensing, zona subcooling). Perhitungan pressure drop untuk mengetahui kerugian tekanan yang terjadi. Melakukan uji performa menggunakan metode NTU- $\epsilon$ . Selain itu, pada re-design ini akan dilakukan variasi terhadap kecepatan feedwater serta plugging.*

*Hasil dari perhitungan, didapatkan dimensi HPH 5 dengan panjang tube 9,614 m, jumlah tube sebanyak 531 buah dan diameter dalam shell yaitu 1 m. Selain itu, untuk zona desuperheating didapatkan panjang zonanya sebesar 0,851 m dengan jumlah baffle 3 buah. Pada zona condensing didapatkan panjang sebesar 7,864 m dengan jumlah baffle 4 buah. Pada zona subcooling didapatkan panjang sebesar 0,899 m dengan jumlah baffle 5 buah. Pressure drop sisi tube sebesar 0,33 kg/cm<sup>2</sup>. Pressure drop sisi shell sebesar 0,3344 kg/cm<sup>2</sup>. Batas plugging yang diijinkan adalah sebesar 10%, jika melebihi 10% plugging akan terjadi vibrasi.*

***Kata Kunci: high pressure heater, re-design, LMTD, pressure drop, baffle, NTU-ε***



# **RE-DESIGN HIGH PRESSURE HEATER (HPH) 5 UNIT 1 AT PT. PJB UP GRESIK USING THERMODYNAMICS AND HEAT TRANSFER ANALYSIS**

**Name : Nadia Parwaty Wijanarko**  
**NRP : 2114 030 047**  
**Department : Industrial Mechanical Engineering**  
**FV-ITS**  
**Counselor Lecturer : Ir. Joko Sarsetiyanto, M.T.**

## ***Abstract***

*At PT. PJB UP Gresik Unit 1 there are 5 feedwater heaters, they are 2 low pressure heaters. (LPH), 2 high pressure heaters (HPH), and 1 deaerator. HPH in this plant is HPH 4 and HPH 5. In this final project, heater that will be re-design is HPH 5. HPH is a feedwater heater with high pressure which is using extraction of turbine steam as a heating medium. The common defectiveness over HPH 5 is tube leakage and baffles worn-out. Continually defectiveness on HPH 5 could reduce effectiveness and performance from HPH.*

*Re-design on HPH 5 is analyzed by thermodynamics on HPH 5 as a control volume. Calculating the heat transfer by LMTD method to get a dimension of each zone. The calculation is to determine the length of each HPH's zone, heat transfer rate, Overall Heat Transfer Coefficient ( $U$ ), heat transfer area ( $A$ ), pressure drop calculation ( $\Delta P$ ) for tube and shell (for each zone such as desuperheating zone, condensing zone, subcooling zone). Pressure drop calculation was also be done to discover pressure loss that could occur. Perform the performance test using NTU- $\epsilon$  method. Besides that, variant of feedwater speed and number of plugging was used for re-designing HPH 5.*

*The results from calculation, obtained dimension of HPH 5 with length of tube is 9.614 m, number of tubes are 531 and inner diameter of shell is 1 m. Moreover, at desuperheating zone, the*

*length of it was 0.851 m with 3 baffles. At condensing zone, the length was 7.864 m with 4 baffles. And at subcooling zone, the length was 0.899 m with 5 baffles. Pressure drop on tube side is 0,33 kg/cm<sup>2</sup>. Pressure drop on shell side is 0.3344 kg/cm<sup>2</sup>. Plugging point allowed is 10%, if it's above 10% plugging would allow vibration.*

***Key Words: high pressure heater, re-design, LMTD, pressure drop, baffle, NTU- $\epsilon$***

## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| <b>HALAMAN JUDUL (Bhs. Indonesia)</b> ..... | i    |
| <b>HALAMAN JUDUL (Bhs. Inggris)</b> .....   | ii   |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....              | iii  |
| <b>ABSTRAK (Bhs. Indonesia)</b> .....       | iv   |
| <b>ABSTRAK (Bhs. Inggris)</b> .....         | vi   |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....                 | viii |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....                     | x    |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....                  | xiii |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....                   | xv   |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....                | xvi  |

## BAB I PENDAHULUAN

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1.1 Latar Belakang .....        | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah .....       | 4 |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....     | 4 |
| 1.4 Manfaat Penulisan .....     | 5 |
| 1.5 Batasan Masalah .....       | 5 |
| 1.6 Metode Penelitian .....     | 6 |
| 1.7 Sistematika Penulisan ..... | 7 |

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

|   |    |
|---|----|
| 2.1 <i>Feedwater Heater</i> .....   | 9  |
| 2.1.1 <i>Closed Feedwater Heater</i> .....  | 10 |
| 2.1.2 Konstruksi <i>High Pressure Heater</i> .....  | 13 |
| 2.2 Analisis Termodinamika .....  | 17 |
| 2.3 Analisis Perpindahan Panas .....  | 18 |
| 2.3.1 Analisis Perpindahan Panas dengan<br>Metode <i>Log Mean Temperatur Difference</i><br>(LMTD) ..... | 19 |
| 2.3.2 Analisis Perpindahan Panas Eksternal<br>(Sisi <i>Shell</i> ) .....                                | 20 |
| 2.3.2.1 Zona <i>Desuperheating</i> dan<br><i>Subcooling</i> .....                                       | 21 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 2.3.2.2                                   | <i>Zona Condensing</i> .....   | 25 |
| 2.3.3                                     | Analisis Perpindahan Panas Internal<br>( <i>Sisi Tube</i> ) .....  | 27 |
| 2.3.4                                     | Analisis <i>Pressure Drop</i> .....  | 29 |
| 2.3.5                                     | Analisis Perpindahan Panas dengan<br>Metode <i>Number of Transfer Unit</i><br>(NTU) .....                | 32 |
| <br><b>BAB III METODOLOGI</b>             |  |    |
| 3.1                                       | Alur Pelaksanaan Penelitian .....  | 35 |
| 3.2                                       | Perancangan HPH 5 dengan Metode<br>LMTD .....  | 37 |
| 3.3                                       | Perancangan HPH 5 dengan Metode<br>NTU .....   | 37 |
| 3.4                                       | Perancangan HPH 5 .....  | 38 |
| <br><b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b> |  |    |
| 4.1                                       | Analisis Termodinamika .....   | 45 |
| 4.2                                       | Analisis Perpindahan Panas .....   | 49 |
| 4.2.1                                     | Analisis Perpindahan Panas dengan<br>Metode <i>Log Mean Temperatur</i><br><i>Difference</i> (LMTD) ..... | 49 |
| 4.2.2                                     | Analisis Perpindahan Panas Internal<br>( <i>Sisi Tube</i> ) .....  | 51 |
| 4.2.3                                     | Analisis Perpindahan Panas Eksternal<br>( <i>Sisi Shell</i> ) .....                                      | 58 |
| 4.2.3.1                                   | Perpindahan Panas pada Zona<br><i>Desuperheating</i> .....   | 59 |
| 4.2.3.2                                   | Perpindahan Panas pada Zona<br><i>Condensing</i> .....   | 62 |
| 4.2.3.3                                   | Perpindahan Panas pada Zona<br><i>Subcooling</i> .....   | 67 |
| 4.2.3.4                                   | Total <i>Pressure Drop Sisi Shell</i> .....  | 68 |
| 4.3                                       | Desain Optimal HPH 5 .....   | 68 |
| 4.4                                       | Analisis Performance .....   | 68 |

## **BAB V PENUTUP**

|                      |    |
|----------------------|----|
| 5.1 Kesimpulan ..... | 73 |
| 5.2 Saran .....      | 74 |

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b> | <b>xvii</b> |
|-----------------------------|-------------|

## **LAMPIRAN**

## **BIODATA PENULIS**

## DAFTAR GAMBAR

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Gambar 1.1  | Perubahan bentuk dan kebocoran pada <i>tube</i><br>(a) <i>tube</i> yang patah akibat kebocoran,<br>(b) kebocoran pada <i>tube</i> .....  | 2  |
| Gambar 1.2  | Kerusakan pada <i>baffle</i> akibat <i>mechanical vibration</i> .....  | 3  |
| Gambar 1.3  | Menipisnya tebal <i>shell</i> bagian dalam akibat erosi .....  | 3  |
| Gambar 1.4  | Contoh <i>Plugging</i> pada <i>Tube</i> .....  | 4  |
| Gambar 2.1  | <i>Open Feedwater Heater</i> .....   | 9  |
| Gambar 2.2  | <i>Closed Feedwater Heater</i> .....   | 10 |
| Gambar 2.3  | Bentuk standar macam-macam <i>shell</i> tampak atas dan belakang .....   | 11 |
| Gambar 2.4  | <i>Tube Layout Angles</i> .....  | 12 |
| Gambar 2.5  | LPH .....  | 12 |
| Gambar 2.6  | HPH 5 Unit 1 .....   | 13 |
| Gambar 2.7  | Konstruksi <i>High Pressure Heater</i> .....   | 13 |
| Gambar 2.8  | Macam-Macam <i>Plate Baffle</i> .....  | 15 |
| Gambar 2.9  | Macam-Macam <i>Rod Baffle</i> .....  | 16 |
| Gambar 2.10 | a) Sistem Kerja Tertutup<br>b) Sistem Kerja Terbuka Proses Konversi Energi .....   | 17 |
| Gambar 2.11 | Keseimbangan Energi pada Suatu <i>Control Volume</i> .....   | 18 |
| Gambar 2.12 | Faktor Koreksi LMTD Untuk <i>Shell And Tube</i> dengan Satu <i>Shell</i> Dan Kelipatan 2 Lajuan <i>Tube</i> .....  | 20 |
| Gambar 2.13 | Aliran Fluida Melintasi Susunan <i>Tube</i><br>(a) <i>Aligned</i> dan (b) <i>Staggered</i> .....   | 21 |
| Gambar 2.14 | Skema <i>Tube Bank Cross Flow</i> .....  | 22 |
| Gambar 2.15 | <i>Tube Arrangements</i> . (a) <i>Aligned</i><br>(b) <i>Staggered</i> .....  | 22 |
| Gambar 2.16 | <i>Film Condensation</i> pada bola a) bola, b) <i>single horizontal tube</i> , c) <i>tube horizontal</i> yang tersusun <i>vertical</i> dengan <i>continuous condensate sheet</i> , |    |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
|             | d) kondensat yang menetes .....   | 26 |
| Gambar 2.17 | Pembentukan <i>Boundary Layer</i> pada <i>Circular Tube</i> .....   | 28 |
| Gambar 2.18 | Grafik faktor gesek $f$ dan faktor koreksi $X$ untuk susunan <i>tube bundle staggered</i> .....             | 30 |
| Gambar 3.1  | Diagram Alir Penelitian .....   | 36 |
| Gambar 3.2  | Diagram Alir Perhitungan Perpindahan Panas dengan Metode LMTD .....   | 38 |
| Gambar 3.3  | Diagram Alir Perhitungan Perpindahan Panas Internal .....   | 39 |
| Gambar 3.4  | Diagram Alir Perhitungan Perpindahan Panas pada Zona <i>Desuperheating</i> dan Zona <i>Subcooling</i> ..... | 40 |
| Gambar 3.5  | Diagram Alir Perhitungan Perpindahan Panas pada Zona <i>Condensing</i> .....                                | 41 |
| Gambar 3.6  | Diagram Alir Perhitungan NTU- $\epsilon$ dengan Variasi <i>Plugging</i> .....                               | 42 |
| Gambar 4.1  | <i>Control Volume</i> HPH 5 .....   | 45 |
| Gambar 4.2  | Neraca Massa dan Kalor pada HPH 5 .....   | 46 |
| Gambar 4.3  | Pembagian Zona HPH 5 .....  | 48 |
| Gambar 4.4  | Grafik Distribusi Temperatur pada HPH 5 .....   | 49 |
| Gambar 4.5  | <i>Layout Tube</i> HPH 5 .....  | 53 |
| Gambar 4.6  | Pengaruh <i>Reynolds Number</i> pada Koefisien Konveksi dan <i>Pressure Drop Sisi Internal</i> .....        | 57 |
| Gambar 4.7  | Zona <i>Desuperheating</i> .....  | 59 |
| Gambar 4.8  | Zona <i>Condensing</i> .....  | 62 |
| Gambar 4.9  | Zona <i>Subcooling</i> .....  | 67 |
| Gambar 4.10 | Pengaruh Koefisien Konveksi dan <i>Pressure Drop</i> terhadap <i>Plugging</i> .....                         | 71 |
| Gambar 4.11 | Pengaruh NTU dan $\epsilon$ Akibat <i>Plugging</i> .....  | 72 |

## DAFTAR TABEL

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabel 2.1 | Konstanta Persamaan 2.12 untuk Aliran<br>Melewati <i>Tube Banks</i> dengan Jumlah<br>Baris $\geq 20$ ..... | 24 |
| Tabel 4.1 | Properties Fluida pada HPH 5 .....   | 46 |
| Tabel 4.2 | Variasi Kecepatan <i>Feedwater</i> pada <i>Tube</i> .....  | 52 |
| Tabel 4.3 | Spesifikasi <i>Tube</i> pada HPH 5 .....   | 53 |
| Tabel 4.4 | Perhitungan <i>Pressure Drop</i> Sisi Internal<br>Akibat <i>Minor Losses</i> .....                         | 56 |
| Tabel 4.5 | Hasil Perhitungan Variasi Kecepatan <i>Tube</i> .....  | 57 |
| Tabel 4.6 | Desain Optimal HPH 5 .....   | 68 |
| Tabel 4.7 | Hasil Perhitungan NTU- $\epsilon$ Variasi<br>0-10% <i>Plugging</i> .....                                   | 71 |



## DAFTAR LAMPIRAN

|               |   |
|---------------|---|
| LAMPIRAN I    | Tabel A2. Thermophysical Properties of Selected Nonmetallic Solids                        |
| LAMPIRAN II   | Tabel Kecepatan Feedwater Maksimum yang Diiijinkan Berdasarkan Jenis Material <i>Tube</i> |
| LAMPIRAN III  | Tabel 8.1 Dimensional Data for Commercial Tubing  |
| LAMPIRAN IV   | Tabel A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids                           |
| LAMPIRAN V    | Tabel A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water                                    |
| LAMPIRAN VI   | Moody Diagram   |
| LAMPIRAN VII  | Tabel 8.1 <i>Roughness</i> Pipa   |
| LAMPIRAN VIII | Tabel 8.2 Koefisien pipa untuk <i>minor losses</i>  |
| LAMPIRAN IX   | Calculation Sheet HPH 5   |
| LAMPIRAN X    | Design Data HPH 5   |
| LAMPIRAN XI   | Construction Data HPH 5   |

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Semakin bertambahnya jumlah penduduk, semakin bertambah pula kebutuhan akan energi, salah satunya energi listrik. Oleh karena itu, merupakan suatu hal yang lumrah jika listrik menjadi bagian yang tak terpisahkan di kehidupan masyarakat sehari-hari dewasa ini.

Salah satu cara memproduksi listrik dengan skala yang besar yaitu dengan memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Salah satu perusahaan yang mempunyai PLTU yaitu PT. PJB UP. Gresik. Pembangkit listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit tenaga listrik yang dihasilkan dari daya yang dibangkitkan Sistem Turbin Uap. Biasanya PLTU berada di tepi pantai karena bahan dasarnya adalah air laut yang akan diuapkan.

Secara sederhana prinsip kerja dari PLTU yaitu air dipanaskan di *boiler* sampai menghasilkan uap panas (*superheated*). Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin. Dari putaran turbin, dihasilkan energi mekanis yang akan digunakan untuk menggerakkan generator. Pada generator, energi mekanis diubah menjadi energi listrik.

Dalam uraian di atas, dapat diketahui bahwa boiler merupakan salah satu komponen utama pada PLTU dalam hal memanaskan air pengisi (*feedwater*) untuk memproduksi uap. Semakin tinggi temperatur air pengisi yang masuk *boiler*, maka bahan bakar yang digunakan untuk memanaskan air akan semakin hemat sehingga efisiensi siklus akan semakin besar. Maka dari itu, salah satu cara agar mengurangi beban kerja atau meningkatkan efisiensi pada *boiler* tersebut yaitu dengan menambahkan *feedwater heater* sebelum *boiler*. *Feedwater heater* adalah suatu alat penukar kalor yang memanaskan air pengisi sebelum masuk *boiler*. *Feedwater heater* terdiri dari beberapa jenis, tergantung dari fungsinya masing-masing dalam

suatu instalasi. Pada PT. PJB UP. Gresik Unit 1 terdapat 5 *feedwater heater*, yaitu 2 *low pressure heater*, 2 *high pressure heater*, dan 1 *deaerator*.

Penelitian ini akan membahas tentang kajian dalam mendesain salah satu jenis *closed feedwater heater*, yaitu *high pressure heater*, khususnya HPH 5. HPH 5 ini merupakan *heat exchanger* jenis *shell and tube*. Adanya HPH 5 ini dapat mengurangi beban *boiler* karena sebelum masuk *boiler*, *feedwater* dipanaskan terlebih dahulu di HPH. Kerusakan yang sering terjadi pada HPH adalah kebocoran *tube* dan keausan *baffle*. Kebocoran *tube* menyebabkan bertambahnya kecepatan aliran *feedwater heater* di dalam *tube* dan berkurangnya luasan yang dilalui oleh aliran *feedwater*. Adapun jenis-jenis dan lokasi kerusakan tersebut yaitu :

#### 1. *Tubes*

Kerusakan pada *tubes* berupa kebocoran, terjadinya retakan, patah, atau terjadinya perubahan bentuk penampang. Hal ini disebabkan abrasi akibat bergesekan dengan *tube* yang patah. Lokasi yang umum untuk terjadinya patah yaitu di dekat *baffle* penyangga *tube* tetapi ada yang patah di daerah sambungan dengan *tube plate/sheet*.



(a)



(b)

Gambar 1.1 Perubahan bentuk dan kebocoran pada *tube*. (a) *tube* yang patah akibat kebocoran, (b) kebocoran pada *tube*

(Sumber: "Tugas Akhir Dhany Ahmad Barkah")

## 2. *Baffle / Support Plates*

Kerusakan yang biasanya terjadi pada *baffle* yaitu pembesaran lubang diameter *tube*. Hal ini disebabkan oleh vibrasi yang terjadi pada pipa. Sedangkan pada *plate support* kerusakan yang terjadi yaitu penipisan ketebalan plat yang disebabkan oleh erosi akibat aliran uap.



Gambar 1.2 Kerusakan pada *baffle* akibat *mechanical vibration*

(Sumber: "Tugas Akhir Dhany Ahmad Barkah")

## 3. *Shell*

Kerusakan yang terjadi pada *shell* ini diakibatkan oleh aliran air yang bertekanan tinggi dari dalam pipa yang bocor sehingga semburannya mengenai *shell* yang pada akhirnya *shell* seperti mengalami *water jet cutting*.



Gambar 1.3 Menipisnya tebal *shell* bagian dalam akibat erosi

(Sumber: "Tugas Akhir Dhany Ahmad Barkah")

Untuk mengatasi masalah tersebut, selama ini dilakukan penyumbatan aliran *tube* pada lubang *inlet* dan *outlet tube* yang bocor (*plugging*), atau dilakukan penggantian *tube* yang rusak (*retubing*).



Gambar 1.4 Contoh *Plugging* pada *Tube*

Kerusakan pada HPH terus menerus berulang sehingga dapat mengurangi efektifitas dan performa dari HPH, serta temperatur air pengisi *boiler* pada *inlet economizer* akan turun, sehingga butuh pemanasan yang lebih besar. Hal ini akan berakibat naiknya konsumsi bahan bakar pada *boiler* sehingga dapat menurunkan efisiensi siklus PLTU dan biaya produksi akan meningkat. Oleh karena itu perlu adanya perhatian lebih untuk menjaga performa dari HPH ini. Jika HPH mengalami penurunan performa, dapat dilakukan re-design pada HPH tersebut.

Berdasarkan uraian di atas, pada tugas akhir ini penulis melakukan evaluasi unjuk kerja HPH 5 dengan melakukan perhitungan menggunakan analisis termodinamika dan perpindahan panas dengan metode LMTD (*Log Mean Temperature Difference*) dan NTU (*Number of Transfer Unit*). Dari perhitungan tersebut dapat diketahui dimensi baru pada HPH 5 dengan performa yang lebih baik.

## 1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang tersebut, rumusan masalah yang diangkat dalam penyusunan tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana dimensi utama dari HPH 5 jika dihitung secara teoritis?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penyusunan tugas akhir ini, antara lain :

1. Untuk mendapatkan dimensi utama dari HPH 5 jika dihitung secara teoritis.

#### **1.4 Manfaat Penulisan**

Dengan adanya penulisan tugas akhir ini didapatkan beberapa manfaat yaitu :

1. Dapat memperdalam ilmu tentang perpindahan panas dan alat penukar kalor (*heat exchanger*).
2. Dapat menjadi referensi untuk penulisan tugas akhir selanjutnya yang berhubungan dengan pendesainan pada alat penukar kalor.
3. Menambah kemampuan dalam mendesain *shell and tube heat exchanger* dengan analisis termodinamika dan perpindahan panas.
4. Dapat memberikan kontribusi perbaikan dari sistem pembangkit daya di PT. PJB UP. Gresik.
5. Diharapkan dapat meningkatkan efisiensi siklus pembangkit daya di PT. PJB UP. Gresik.

#### **1.5 Batasan Masalah**

Suatu batasan masalah dalam penelitian sangat diperlukan agar yang dibahas tidak terlalu meluas. Berikut merupakan batasan masalahnya :

1. Analisis dilakukan berdasarkan data operasi HPH 5 di PLTU Unit 1 PT. PJB UP. Gresik.
2. Aliran dalam pipa diasumsikan *fully developed*.
3. Perhitungan dilakukan pada kondisi *steady state*.
4. Analisis termodinamika berdasarkan *control volume*, analisis perpindahan panas dengan metode LMTD, serta metode NTU.
5. Perpindahan panas secara radiasi diabaikan.
6. Analisis kimia mengenai korosi diabaikan.
7. Perpindahan panas ke lingkungan dianggap tidak ada.
8. Perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan.

9. Perhitungan *overall heat transfer coefficient* (U) mengabaikan *fouling factor*.
10. Perancangan tidak melibatkan analisis ekonomi, metalurgi, dan manufaktur.

## 1.6 Metode Penelitian

Metode penelitian tentang re-design pada HPH 5 dengan analisis termodinamika dan perpindahan panas yang digunakan penulis agar mencapai tujuan yang diinginkan di dalam tugas akhir ini adalah :

1. Studi Literatur  
Untuk mendapatkan pengetahuan atau wawasan yang mengacu pada tugas akhir ini, diperlukan studi literatur dengan mencari referensi dari berbagai sumber seperti buku, internet, jurnal, maupun karya ilmiah lainnya yang berhubungan dengan tugas akhir.
2. Konsultasi dengan Dosen Pembimbing dan Mentor  
Melakukan konsultasi dengan dosen pembimbing dan mentor supaya penulisan tugas akhir dapat terarahkan.
3. Observasi Data  
Melakukan observasi data-data melalui media internet, buku atau jurnal dan dari hasil pengamatan langsung di PLTU Unit 1 PT. PJB UP. Gresik.
4. Analisis Perhitungan  
Melakukan analisis termodinamika terhadap HPH 5 sebagai *control volume*. Melakukan perhitungan perpindahan panas dengan metode LMTD untuk mendapatkan dimensi tiap zona. Perhitungan yang dilakukan yaitu menentukan panjang masing-masing tiap zona HPH, laju perpindahan panas, *Overall Heat Transfer Coefficient* (U), luas perpindahan panas (A), perhitungan *pressure drop* ( $\Delta P$ ) pada *tube* dan *shell* (untuk masing-masing zona yaitu zona *desuperheating*, zona *condensing*, zona *subcooling*). Melakukan uji performa menggunakan metode NTU.

5. Pembuatan Laporan Tugas Akhir

Setelah semua tahap penelitian selesai, pembuatan laporan dapat dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh.

### **1.7 Sistematika Penulisan**

Dalam laporan tugas akhir ini memiliki 5 bab, agar alur pemikiran penulis dapat diikuti dan dipahami secara utuh maka disusunlah suatu kerangka penulisan yang bersifat umum, yaitu sebagai berikut :

**BAB I : PENDAHULUAN**

Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penulisan, metode penelitian dan sistematika penulisan.

**BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi teori-teori yang menunjang pelaksanaan penelitian dan perhitungan yang digunakan sebagai dasar dalam penulisan tugas akhir. Berhubungan dengan *feedwater heater*, termodinamika, dan perpindahan panas.

**BAB III : METODOLOGI**

Bab ini menjelaskan tentang metode yang digunakan dalam proses analisis serta urutan pengerjaan hingga menghasilkan output yang diinginkan.

**BAB IV : ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menjelaskan tentang contoh perhitungan, hasil yang didapatkan dari pengolahan data, dan pembahasan mengenai hasil yang diperoleh.

**BAB V : PENUTUP**

Berisi tentang kesimpulan dari penyusunan tugas akhir serta saran untuk PT. PJB. UP Gresik dan untuk penelitian selanjutnya.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

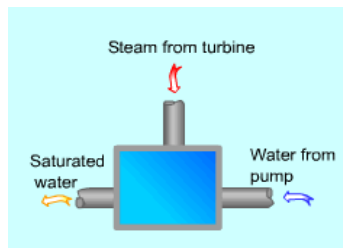
#### 2.1 *Feedwater Heater*

*Feedwater heater* merupakan suatu peralatan yang digunakan pada siklus pembangkit uap *regenerative*. Dengan adanya *feedwater heater* ini, diharapkan ada dua hal yang bisa diraih, yaitu yang pertama untuk meningkatkan temperatur dari *feedwater* yang mana akan meningkatkan efisiensi keseluruhan. Kedua, yaitu untuk meminimalkan efek termal pada *boiler*. Prinsip kerja dari *feedwater heater* yaitu dengan memanaskan lagi air keluaran kondensor dengan menggunakan ceratan uap dari turbin dan pada instalasi tertentu ditambahkan juga drain dari *feedwater heater* lainnya. Umumnya, *feedwater heater* menggunakan gabungan beberapa pemanas dengan tekanan tertentu sesuai dengan tekanan yang dicerat dari turbin. Jumlah dan tipe dari *feedwater heater* sangat tergantung dari siklus uapnya, tekanan operasi dari siklusnya, dan segi ekonomi dari *plant*, misal biaya operasi yang lebih rendah dapat mengimbangi pengeluaran biaya modal tambahan.

Ada 2 tipe dari *feedwater heater*, diantaranya:

1. *Open Feedwater Heater*

Pada *open feedwater heater*, uap hasil *extraction* dan *feedwater* bercampur, sehingga mempunyai temperatur yang sama.

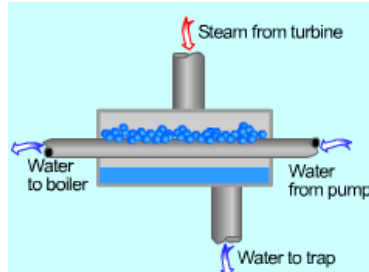


Gambar 2.1 *Open Feedwater Heater*

(Sumber: "<http://www.hkdivedi.com/2016/11/difference-between-open-feedwater.html>")

## 2. *Closed Feedwater Heater*

*Closed feedwater heater* adalah alat penukar kalor jenis *shell and tube* dimana aliran *feedwater* mengalir di sisi *tube* sedangkan uap hasil *extraction* turbin berkondensasi di sisi *shell*.



Gambar 2.2 *Closed Feedwater Heater*

(Sumber: "<http://www.hkdivedi.com/2016/11/difference-between-open-feedwater.html>")

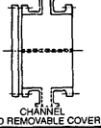
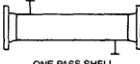
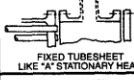
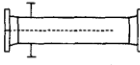
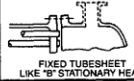
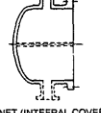


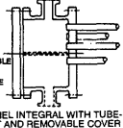
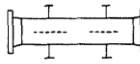
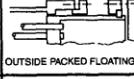
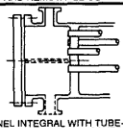
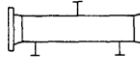
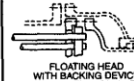

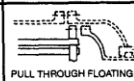
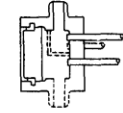
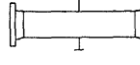
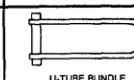
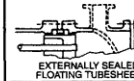
### 2.1.1 *Closed Feedwater Heater*

*Shell and tube heat exchanger* merupakan salah satu tipe *heat exchanger* yang digunakan pada *closed feedwater heater*. Tipe *shell and tube* sering digunakan pada air conditioning dan sistem refrigerasi. *Shell and tube heat exchanger* terdiri dari kumpulan *tube* melengkung yang terpasang pada *cylindrical shell* dengan posisi *tube* yang parallel pada shellnya. Fluida pertama mengalir di dalam *tube* sementara fluida yang lain mengalir di sepanjang arah aliran di luar *tube*. Komponen utama pada *shell and tube heat exchanger* ini adalah *tube (tube bundle)*, *shell*, bagian depan, bagian belakang, *baffle*, dan *tube sheet*.

Dalam mendisain sebuah *heat exchanger* jenis *shell-and-tube*, banyak terdapat bermacam-macam desain konstruksi internalnya. Hal ini berkenaan dengan besaran perpindahan kalor yang diinginkan, *pressure drop* yang diperbolehkan, dan metode yang digunakan untuk mengurangi *thermal stress*, untuk mencegah kebocoran, untuk kemudahan dalam pembersihan, untuk mencapai tekanan dan temperatur operasi, untuk

mengontrol korosi, untuk mengakomodasi aliran yang sangat asimetri, dan lain-lain.

Berbagai bentuk dari *shell*, bagian depan dan belakang *heat exchanger* sudah diatur oleh TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*). Penggolongan ini ditampilkan dalam tabel berikut:

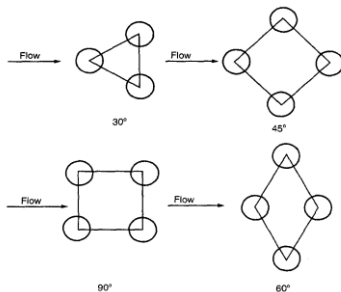
| FRONT END<br>STATIONARY HEAD TYPES |   | SHELL TYPES |   | REAR END<br>HEAD TYPES |  |
|------------------------------------|---|-------------|---|------------------------|--|
| A                                  |    | E           | <br>ONE PASS SHELL                             | L                      | <br>FIXED TUBESHEET<br>LIKE "A" STATIONARY HEAD |
|                                    | CHANNEL<br>AND REMOVABLE COVER  | F           | <br>TWO PASS SHELL<br>WITH LONGITUDINAL BAFFLE | M                      | <br>FIXED TUBESHEET<br>LIKE "B" STATIONARY HEAD |
| B                                  | <br>BONNET (INTEGRAL COVER)                                  | G           | <br>SPLIT FLOW                                 | N                      | <br>FIXED TUBESHEET<br>LIKE "N" STATIONARY HEAD |
| C                                  | <br>REMOVABLE<br>TUBE<br>BUNDLE<br>ONLY                      | H           | <br>DOUBLE SPLIT FLOW                          | P                      | <br>OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD                |
| N                                  | <br>CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-<br>SHEET AND REMOVABLE COVER | J           | <br>DIVIDED FLOW                               | S                      | <br>FLOATING HEAD<br>WITH BACKING DEVICE        |
|                                    | CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-<br>SHEET AND REMOVABLE COVER  | K           | <br>KETTLE TYPE REBOILER                       | T                      | <br>PULL THROUGH FLOATING HEAD                  |
| D                                  | <br>SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE                          | X           | <br>CROSS FLOW                               | U                      | <br>U-TUBE BUNDLE                              |
|                                    |   |             |   | W                      | <br>EXTERNALLY SEALED<br>FLOATING TUBESHEET   |

Gambar 2.3 Bentuk standar macam-macam *shell* tampak atas dan belakang

(Sumber: "Heat Exchanger: Selection, Rating, and Thermal Design  
Second Edition, Sadik Kakac, 2002")

*Tube bundle* kebanyakan disusun dengan memiliki belokan (bend) yang berbentuk seperti huruf U. Jenis *tube* seperti ini tidak bisa dibersihkan dengan cara mekanik karena adanya

belokan yang sulit dijangkau. Terdapat pula karakteristik susunan *tube* yang digolongkan berdasarkan kemiringan sudut di antara *tube-tubenya*.



**Gambar 2.4 Tube Layout Angles**

(Sumber: “*Heat Exchanger: Selection, Rating, and Thermal Design*  
*Second Edition, Sadik Kakac, 2002*”)

Berdasarkan tekanannya, *closed feedwater heater* dibagi menjadi dua yaitu *Low Pressure Heater* (LPH) dan *High Pressure Heater* (HPH). Pada instalasi pembangkit daya, LPH terletak antara *condensate pump* dan *deaerator*. Sedangkan HPH terletak antara *boiler feed pump* dan *economizer*. LPH Adalah alat pemanas air pengisi sebelum menuju ke *deaerator*. Pemanas ini menggunakan uap bekas turbin dengan tekanan rendah. HPH merupakan alat pemanas air pengisi lanjut tekanan tinggi dengan menggunakan uap bekas turbin sebagai media pemanasnya sebelum masuk *economizer*.



**Gambar 2.5 LPH**

(Sumber: “*PT. PJB UP. Gresik*”)

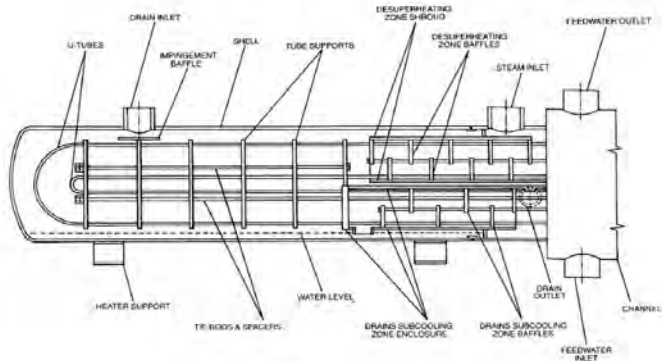


Gambar 2.6 HPH 5 Unit 1  
(Sumber: "PT. PJB UP. Gresik")

Pada tugas akhir ini akan membahas re-design pada HPH 5 Unit 1 di PT.PJB UP. Gresik.

### 2.1.2 Konstruksi *High Pressure Heater*

Secara umum, komponen utama *closed feedwater heater* adalah:



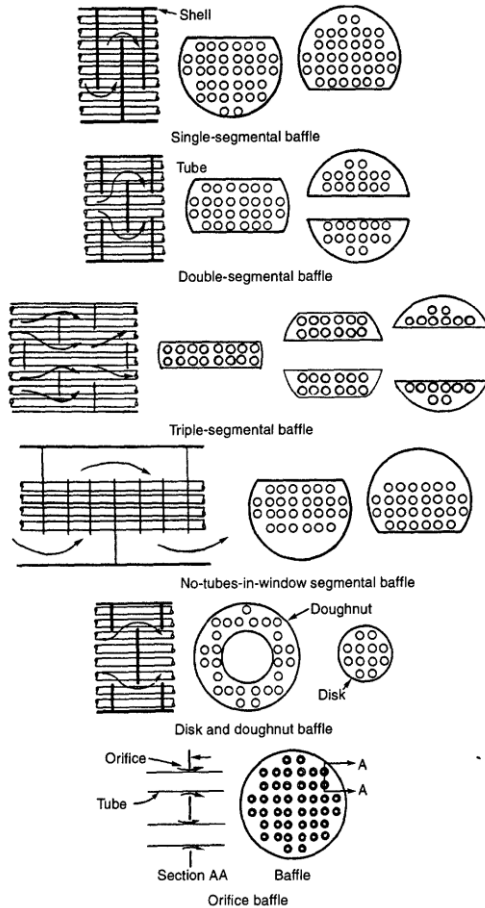
Gambar 2.7 Konstruksi *High Pressure Heater*  
(Sumber: "Standards for Closed Feedwater Heater, Heat Exchanger Institute, Inc, 2004")

1. *Shell*, cangkang / selongsong / silinder panjang yang melingkupi *tube* yang dibuat dari plat baja yang diroll dan dilas ada juga dapat terbuat dari plat baja campuran.

2. *U – Tubes*, tube yang dibengkokkan menyerupai bentuk huruf U, sebagai tempat *feedwater* mengalir masuk dan keluar melalui *channel*.
3. *Feedwater Nozzle*, saluran masuk dan keluar *feedwater* yang dihubungkan dengan *channel*.
4. *Inlet dan Outlet Nozzle*, saluran masuk dan keluar sisi *shell*.
5. *Channel*, saluran masuk dan keluarnya *feedwater*. *Channel* HPH dibuat dari baja yang ditempa, di mana tube sheet dan kepala plat *channel* terbuat dari baja karbon. *Channel* berbentuk setengah bola dan di dalamnya terdapat sekat-sekat untuk laluan *feedwater* di dalam *channel*.
6. *Heater Support*, penyangga *feedwater heater*.
7. *Impingement Plate*, piringan yang ada pada saluran uap masuk ataupun *drain* untuk melindungi *tube* dari aliran uap / *drain* yang masuk *heat exchanger*.
8. *Water Level* digunakan untuk mengetahui ketinggian air yang berada di sisi *shell*.
9. *Tubes Support*, penyangga *tube* dan melindungi *tube* dari gesekan satu sama lain.
10. *Tie Rods and Spacers*, alat ini berfungsi menopang *tube bundle* dan *baffle* supaya terikat dengan benar.
11. *Tubesheet*, pelat *disk* yang dibor sebagai tempat ujung-ujung *U–tubes* dipasang.
12. *Pass Partition*, sekat laluan/ plat yang memisahkan *feedwater inlet* dan *feedwater outlet*.
13. *Vent* untuk melepaskan *noncondensable gases* dari sisi *shell* dan *tube* pada saat *startup* dan operasi normal dari *heat exchanger*.
14. *Covering plate* digunakan untuk memisahkan zona *desuperheating* dan zona *drain cooling* dari zona *condensing*.
15. *Baffle*, berfungsi sebagai penyangga *tube*, menjaga jarak antar masing-masing *tube*, menjaga agar konstruksi *tube* berada pada kondisi rigid sehingga dapat menahan vibrasi yang ditimbulkan oleh tekanan dan suhu fluida. Disamping

itu juga sebagai pengatur arah aliran fluida pada *shell side* agar mendapatkan koefisien perpindahan panas yang besar. Ada 2 tipe *baffle*, yaitu *plate baffle* dan *rod baffle*.

- *Plate Baffle*

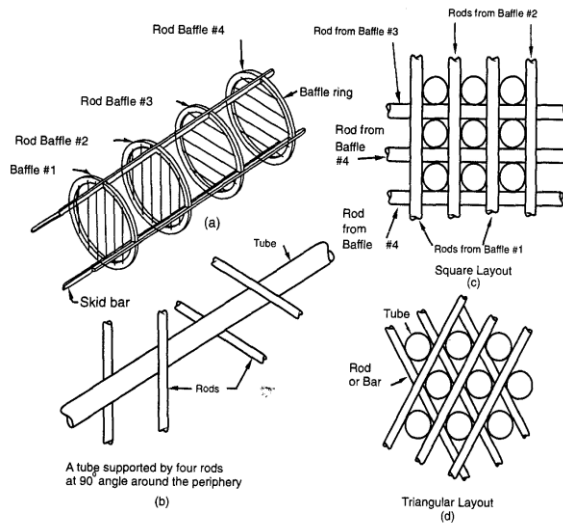


Gambar 2.8 Macam-Macam *Plate Baffle*

(Sumber: "Heat Exchanger: Selection, Rating, and Thermal Design  
Second Edition, Sadik Kakac, 2002")



- *Rod Baffle*



Gambar 2.9 Macam-Macam Rod Baffle

(Sumber: "Heat Exchanger: Selection, Rating, and Thermal Design  
Second Edition, Sadik Kakac, 2002")

*High Pressure Heater* beroperasi pada tiga zona operasi. Tiga zona tersebut yaitu :

- *Desuperheating zone (DSZ)*  
Merupakan daerah dalam sisi *shell* yang disekat-sekat oleh *baffle*. Uap yang masuk ke dalam *feedwater heater* adalah uap hasil ekstraksi turbin berupa uap panas lanjut. Pada zona ini terjadi penurunan temperatur uap panas lanjut sampai pada temperatur uap jenuhnya. Pada zona ini tidak terjadi perubahan fasa.
- *Condensing zone (CZ)*  
Merupakan daerah terbesar pada *feedwater heater*. Pada zona ini uap ekstraksi turbin dan *drain* dari HPH sebelumnya mengalami kondensasi sampai mencapai temperature cair jenuh dan melepaskan kalor laten. Pada

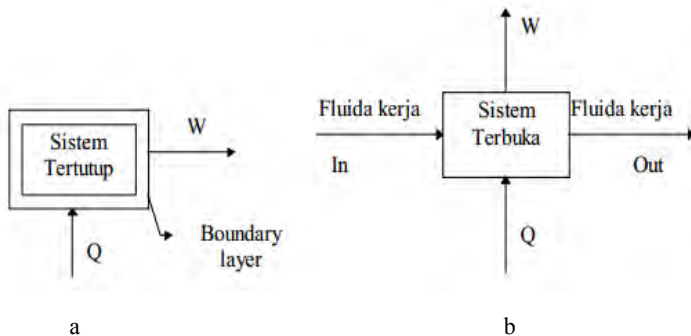
zona ini terjadi proses perubahan fasa dimana uap jenuh berubah menjadi cair jenuh.

- *Subcooling zone* (SCZ)

Merupakan daerah yang juga disekat-sekat oleh *baffle*. Pada zona ini terjadi penurunan temperatur sampai dibawah temperatur cair jenuh untuk mengurangi potensi kerusakan dan erosi pada pipa dan katup akibat *flashing*. Perubahan fasa tidak terjadi pada zona ini. Zona ini disebut juga zona *drain cooling*.

## 2.2 Analisis Termodinamika

Proses termodinamika di dalam siklus rankine merupakan gambaran dari proses konversi energi di dalam siklus kerja PLTU. Terdapat dua jenis sistem termodinamika, yaitu sistem tertutup dan sistem terbuka yang digambarkan sebagai berikut:

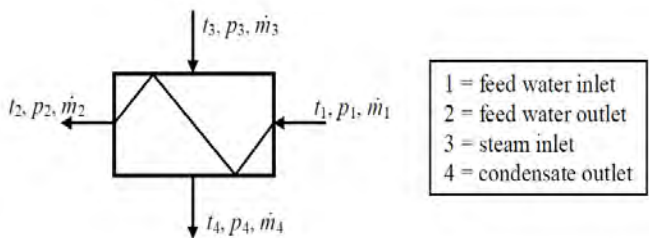


Gambar 2.10 a) Sistem Kerja Tertutup b) Sistem Kerja Terbuka  
Proses Konversi Energi

(Sumber: "Tugas Akhir Tara Puspita Sari")

Pada sistem tertutup, yang melintasi garis batas (*boundary layer*) hanyalah aliran kalor dan kerja saja dan tidak terdapat pertukaran massa dengan lingkungan, sedangkan pada sistem terbuka, memungkinkan massa dan energi mengalir masuk dan

keluar melintasi batas dari sistem. Dalam analisis termodinamika pada sistem tertutup digunakan volume atur (*control volume*). *Control volume* pada HPH dapat ditunjukkan pada gambar 2.11 di mana sisi *shell* mengalir fluida pemanas berupa *steam* ekstraksi turbin serta *drain steam* dari HPH *stage* sebelumnya dan pada sisi *tube* mengalir fluida yang akan dipanaskan berupa *feedwater* yang dipompakan oleh *boiler feed pump*.



Gambar 2.11 Kesetimbangan Energi pada Suatu *Control Volume*  
 (Sumber: “*Thermodynamical Analysis Of High-Pressure Feed Water Heater In Steam Propulsion System During Exploitation*”)

Maka kesetimbangan energi untuk *control volume* di atas adalah:

$$Q_{out} = Q_{in} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$Q_{hot} = Q_{cold} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\dot{m}_{hot} \cdot \Delta h = \dot{m}_{cold} \cdot C_{p,cold} \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

- Q = laju perpindahan panas (kj/s)
- $\dot{m}$  = laju alir massa (kg/s)
- h = entalphi (kj/kg)
- $C_p$  = mean spesifik heat (kj/kgK)
- T = temperatur (K)

**2.3 Analisis Perpindahan Panas**

Perpindahan panas dapat didefinisikan sebagai perpindahan energi panas (kalor) sebagai akibat adanya perbedaan temperatur. Panas berpindah dari tempat dengan temperatur yang lebih tinggi

menuju ke tempat dengan temperatur yang lebih rendah. Perpindahan panas dapat pula terjadi dalam bentuk pertukaran panas dengan sistem di luarnya. Penambahan atau pengurangan panas dapat merambat dan mempengaruhi bagian lain di luar sistem. Dengan kata lain, panas dapat berpindah dari manapun baik itu di dalam maupun di luar sistem selama terdapat perbedaan temperatur.

### 2.3.1 Analisis Perpindahan Panas dengan Metode Log Mean Temperatur Difference (LMTD)

Untuk melakukan perancangan dan menghitung performa sebuah heat exchanger maka diperlukan data tentang besarnya kapasitas fluida masuk dan keluar, koefisien perpindahan panas total, laju perpindahan panas, luas permukaan perpindahan panas, dan beberapa data tambahan.

Dengan menggunakan metode LMTD (*log mean temperature difference*) dapat diperoleh nilai laju perpindahan panas. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$q = UA\Delta T_{LMTD} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \Delta T_{LMTD,CF} \times F \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\Delta T_{LMTD,CF} = \frac{(T_{h,i}-T_{c,o})-(T_{h,o}-T_{c,i})}{\ln\left[\frac{(T_{h,i}-T_{c,o})}{(T_{h,o}-T_{c,i})}\right]} \dots\dots\dots (2.6)$$

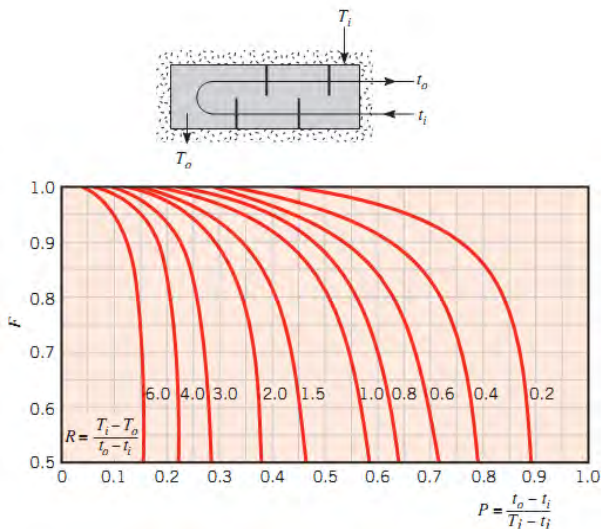
$$A = \pi \times d_o \times L \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan :

- q = laju perpindahan panas
- A = luas permukaan daerah perpindahan panas
- $\Delta T_{LMTD}$  = *log mean temperature difference*
- $\Delta T_{LMTD,CF}$  = *log mean temperature difference cross flow*
- $T_{h,i}$  = temperatur masuk fluida panas
- $T_{h,o}$  = temperatur keluar fluida panas
- $T_{c,i}$  = temperatur masuk fluida dingin
- $T_{c,o}$  = temperature keluar fluida dingin

$d_o$  = diameter luar *tube*  
 $L$  = panjang *tube*  
 $F$  = faktor koreksi

Sedangkan nilai  $F$  merupakan nilai faktor koreksi terhadap  $\Delta T_{LM}$  akibat jumlah *tube passes* pada sisi *shell*.  $F$  merupakan fungsi dari temperatur kedua fluida. Dengan menghitung variabel  $P$  dan  $R$ , maka akan didapat nilai  $F$  dari grafik LMTD *correction factor*. *Properties* fluida dapat dicari dengan mengetahui temperatur fluida sehingga laju perpindahan panas dapat dihitung. Setelah didapatkan koefisien perpindahan panas,  $\Delta T_{LM}$  dan nilai  $F$ , luas permukaan yang dikenai panas dapat diperoleh.



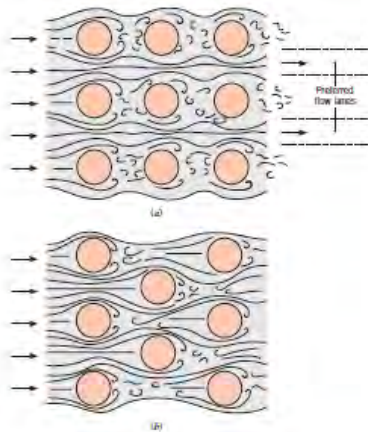
Gambar 2.12 Faktor Koreksi LMTD Untuk *Shell And Tube* dengan Satu *Shell* Dan Kelipatan 2 Lajuan *Tube*

Sumber: ("Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition")

### 2.3.2 Analisis Perpindahan Panas Eksternal (Sisi *Shell*)

Proses perpindahan panas sisi *shell* pada masing-masing zona dianalisa berdasarkan analisa aliran fluida *external* melintasi

*tube banks*. Ada dua jenis susunan *tube*, yaitu *aligned* dan *staggered*.



Gambar 2.13 Aliran Fluida Melintasi Susunan *Tube* (a) *Aligned* dan (b) *Staggered*

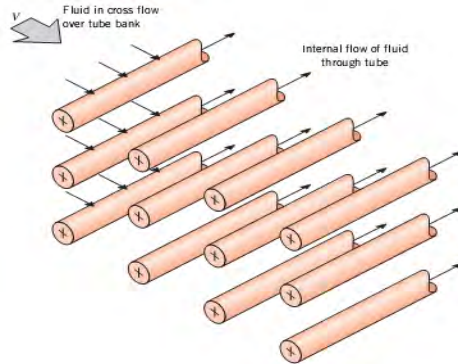
(Sumber: “*Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition*”)

Untuk susunan *staggered*, nilai koefisien perpindahan panas konveksi bergantung pada turbulensi aliran. Tingkat turbulensi aliran dipengaruhi oleh susunan *tube banks* yang dilalui oleh fluida dan jumlah baris *tube*. *Tube* baris pertama akan bertindak sebagai *turbulent grid* sehingga aliran fluida akan bertumbukan dengan *tube* baris pertama sehingga akan menghasilkan aliran turbulen pada baris *tube* selanjutnya dan dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi pada *tube* baris selanjutnya. Perpindahan panas pada fluida yang melintasi *tube bank* akan stabil (perubahan koefisien perpindahan panas yang terjadi kecil) setelah *tube* baris keempat atau kelima. Analisa perpindahan panas pada masing-masing zona adalah:

### 2.3.2.1 Zona *Desuperheating* dan *Subcooling*

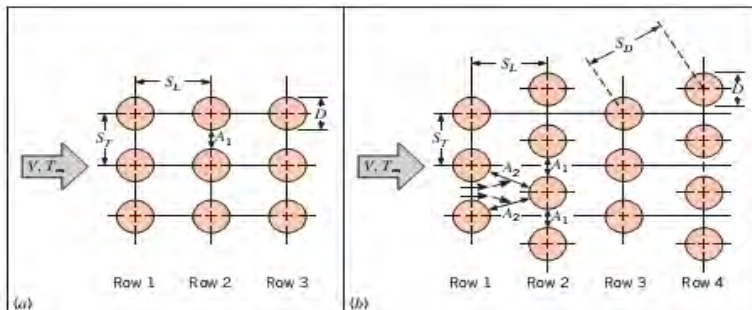
Pada zona *desuperheating* dan *draincooling* perhitungan dikhususkan dengan menggunakan keadaan *low-speed, forced convection*, dan tanpa perubahan fase pada fluida. Pada bagian ini

gerakan relatif antara fluida dan permukaan perpindahan panas dijaga oleh peralatan seperti fan dan pompa. Gerakan relatif fluida tidak dikarenakan oleh gaya *buoyancy* yang terjadi akibat gradien temperatur pada fluida.



Gambar 2.14 Skema *Tube Bank Cross Flow*  
(Sumber: “Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition”)

Jajaran dari *tube* pada jenis ini dapat tersusun secara *aligned* atau *staggered*. Konfigurasi dapat ditentukan dengan melihat diameter ( $D$ ), *transverse pitch* ( $S_T$ ), dan *longitudinal pitch* ( $S_L$ ) yang diukur dari titik pusat *tube*.



Gambar 2.15 *Tube Arrangements*. (a) *Aligned*. (b) *Staggered*.  
(Sumber: “Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition”)

Pada susunan *tube* pada gambar maka kecepatan maksimum fluida dapat terjadi pada luasan  $A_1$  maupun  $A_2$ . Untuk mengetahuinya, digunakan persamaan berikut untuk mengetahui kecepatan maksimum pada  $A_2$ ,

$$2(S_D - d_o) < (S_T - d_o) \dots\dots\dots (2.8)$$

Maka untuk menghitung  $V_{\max}$

$$V_{\max} = \frac{S_T}{2S_D - d_o} V_s \dots\dots\dots (2.9)$$

Bila syarat tersebut tidak terpenuhi, maka kecepatan maksimum terjadi pada luasan  $A_1$  dan  $V_{\max}$  dapat dihitung dengan persamaan:

$$V_{\max} = \frac{S_T}{S_T - d_o} V_s \dots\dots\dots (2.10)$$

Setelah didapatkan nilai  $V_{\max}$ , *Reynolds Number* dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Re_{D, \max} = \frac{\rho_{\text{zona}} V_{\max} d_o}{\mu_{\text{zona}}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Nilai  $Re$  ini digunakan untuk menghitung nilai *Nusselt Number* yang digunakan untuk menghitung nilai koefisien konveksi daerah *desuperheating*. Untuk fluida yang mengalir melintasi *tube bundle* yang tersusun 20 atau lebih baris digunakan persamaan berikut,

$$Nu_D = C \cdot Re_{D\max}^m \cdot Pr^{0,36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \dots\dots\dots (2.12)$$

Rumus di atas berlaku untuk,

$$\left[ \begin{array}{c} N_L \geq 20 \\ 1000 < Re_{D, \max} < 2 \times 10^6 \\ 0,7 < Pr < 500 \end{array} \right]$$



Dimana :

- $h$  = koefisien perpindahan panas  
 $Nu_D$  = *Nusselt number*  
 $Re$  = *Reynold number*  
 $Pr$  = *Prandtl number*  
 $Pr_s$  = *Prandtl number* pada temperatur surface  
 $k$  = Konduktifitas termal  
 $D$  = Diameter *tube*  
 $N_L$  = Jumlah jajaran

Untuk koefisien  $C$  dan  $m$  didapatkan dari tabel 2.1, berikut tabel tersebut:

Tabel 2.1 Konstanta Persamaan 2.12 untuk Aliran Melewati *Tube Banks* dengan Jumlah Baris  $\geq 20$

| Configuration                               | $Re_{D,max}$                  | $C_1$  | $m$  |
|---|-------------------------------|--|------|
| Aligned                                     | $10-10^2$                     | 0.80   | 0.40 |
| Staggered                                   | $10-10^2$                     | 0.90   | 0.40 |
| Aligned                                     | $10^2-10^3$                   | Approximate as a single<br>(isolated) cylinder | 0.63 |
| Staggered                                   | $10^2-10^3$                   |  |      |
| Aligned<br>( $S_T/S_L > 0.7$ ) <sup>a</sup> | $10^3-2 \times 10^3$          | 0.27   | 0.63 |
| Staggered<br>( $S_T/S_L < 2$ )              | $10^3-2 \times 10^3$          | $0.35(S_T/S_L)^{1/4}$                          | 0.60 |
| Staggered<br>( $S_T/S_L > 2$ )              | $10^3-2 \times 10^3$          | 0.40   | 0.60 |
| Aligned                                     | $2 \times 10^3-2 \times 10^6$ | 0.021  | 0.84 |
| Staggered                                   | $2 \times 10^3-2 \times 10^6$ | 0.022  | 0.84 |

<sup>a</sup>For  $S_T/S_L < 0.7$ , heat transfer is inefficient and aligned tubes should not be used.

Koefisien Konveksi

$$h_{o,zona} = \frac{Nu_D k_{zona}}{d_o} \dots\dots\dots (2.13)$$

Overall Heat Transfer Coefficient (U)

$$U = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o \ln(\frac{d_o}{d_i})}{2k} + \frac{1}{h_{o,zona}}} \dots\dots\dots (2.14)$$

Keterangan :

$U$  = overall heat transfer coefficient

$h_i$  = koefisien konveksi akibat aliran di dalam *tube*

$h_o$  = koefisien konveksi akibat aliran di sisi *shell*

$k$  = koefisien konduksi *tube*

Selain itu, perpindahan panas juga dipengaruhi oleh *baffle*. Adapun *baffle* akan mempengaruhi besarnya luasan yang dilalui oleh aliran. Luas area berpengaruh pada kecepatan aliran sisi *shell*. Semakin tinggi kecepatan aliran maka nilai *Reynold Number* semakin tinggi dan aliran semakin turbulent sehingga nilai perpindahan panas yang terjadi semakin besar. Hubungan antara jumlah *baffle* dengan besarnya perpindahan panas dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:

$$N_B = \frac{L_{zona}}{B_s} - 1 \dots\dots\dots (2.15)$$

$$A_s = \frac{ID_{shell} B_s}{N_B + 1} \dots\dots\dots (2.16)$$

Keterangan:

$N_B$  = jumlah *baffle*

$B_s$  = *baffle spacing*

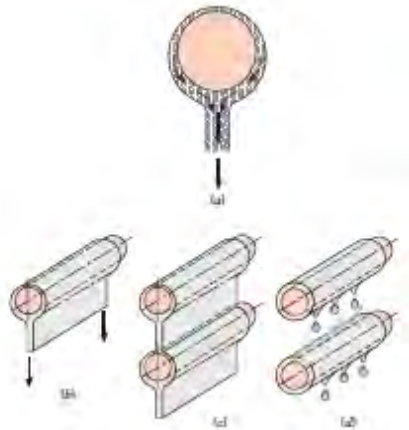
$A_s$  = luas zona yang dilalui oleh aliran

### 2.3.2.2 Zona Condensing

Pada zona condensing terjadi perpindahan panas yang disertai dengan perubahan fase dari uap jenuh menjadi cair jenuh. Dengan adanya perubahan fase ini, hukum *Zukauskas* tidak dapat digunakan. Perpindahan panas pada zona *condensing* dapat dianalisa berdasarkan lapisan kondensasi pada sistem radial pada horizontal *tube*.

Kondensasi yang terjadi di dalam *shell and tube heat exchanger* terbagi menjadi dua jenis yakni *dropwise condensation* dan *film condensation*. Pada *dropwise condensation* kondensat berbentuk bintik embun yang kemudian akibat gaya gravitasi dan

gaya berat yang dimilikinya membuat bintik embun tersebut jatuh menetes secara terus menerus. Sedangkan pada *film condensation*, kondensatnya berbentuk lapisan tipis yang melingkupi dinding pipa yang semakin lama semakin menebal. Lapisan tipis tersebut jatuh ke bawah karena pengaruh gaya gravitasi dan gaya berat.



Gambar 2.16 *Film Condensation* pada bola a) bola, b) *single horizontal tube*, c) *tube horizontal* yang tersusun *vertical* dengan *continuous condensate sheet*, d) kondensat yang menetes  
(Sumber: “Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition”)

Pada perancangan kali ini digunakan pendekatan deretan tegak lurus bertingkat dari *horizontal tube* dengan *continous condensate*. Rata – rata koefisien konveksi untuk susunan *tube* vertikal dari *horizontal tube* adalah:

$$Nu_D = C \left( \frac{g \times \rho_l \times (\rho_l - \rho_v) \times D_o^3 \times h'_{fg}}{k_l \times \mu_l (T_{sat} - T_s)} \right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana nilai C untul *tube* adalah 0,729. Untuk mendapatkan nilai  $h'_{fg}$  maka terlebih dulu mencari nilai *Jacob's number*.

$$Ja = \frac{c_{pl}(T_{sat}-T_s)}{h_{fg}} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$h'_{fg} = h_{fg}(1 + 0,68Ja) \dots\dots\dots (2.19)$$

Maka untuk menghitung nilai koefisien konveksinya digunakan rumus:

$$h_{o,con} = \left( \frac{Nu_D \times k_l}{d_o} \right) \dots\dots\dots (2.20)$$

$$h_{o,N} = h_{o,con} \cdot N_L^n \dots\dots\dots (2.21)$$

$h_{o,N}$  merupakan koefisien konveksi pada bagian atas *tube*. Perhitungan *nusselt number* dapat ditingkatkan dengan menghitung ketebalan lapisan *film* pada *tube* dengan nilai  $n = -1/4$  atau  $n = -1/6$ . Namun dalam perhitungan digunakan nilai empiris sebesar  $n = -1/6$  karena lebih tepat.

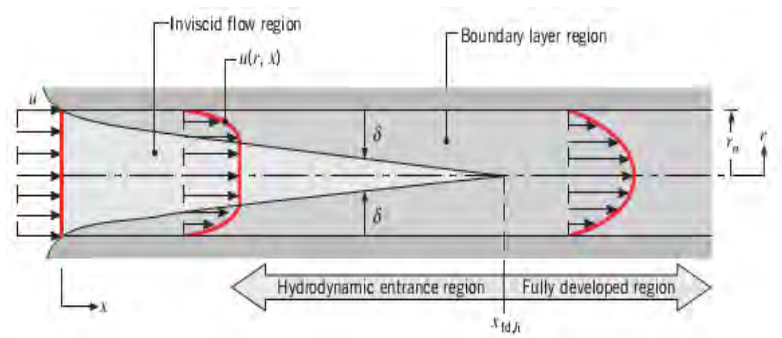
Keterangan :

- $h_o$  = koefisien konveksi
- $C$  = Konstanta untuk *tube*
- $\rho_l$  = massa jenis pada fase liquid
- $\rho_v$  = massa jenis pada fase vapor
- $g$  = percepatan gravitasi
- $k_l$  = koefisien perpindahan panas konduksi pada fase liquid
- $h'_{fg}$  = *Rohsenow Modified Latent Heat*
- $N_L$  = Jumlah *tube* horisontal pada baris vertikal
- $T_{sat}$  = Temperatur saturasi
- $T_s$  = Temperatur *surface*

### 2.3.3 Analisis Perpindahan Panas Internal (Sisi *Tube*)

Perpindahan panas pada sisi *tube* dianalisis berdasarkan perpindahan panas yang terjadi pada aliran internal. Aliran internal adalah aliran fluida yang dibatasi oleh *surface*. Pada aliran internal ini, tidak memungkinkan adanya perkembangan *boundary layer*. Berbeda dengan aliran eksternal yang

memungkinkan terjadinya perkembangan *boundary layer* karena alirannya tidak dibatasi oleh surface.



Gambar 2.17 Pembentukan *Boundary Layer* pada *Circular Tube*  
(Sumber: “*Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition*”)

Pada aliran internal dikenal 2 jenis aliran yaitu aliran laminar dan aliran turbulen. Kedua jenis aliran ini dapat dibedakan berdasarkan nilai *Reynolds Number* nya. Berikut adalah persamaan untuk menghitung nilai *Reynolds Number*:

$$Re_D = \frac{\rho_c V_{tube} d_i}{\mu_c} \dots\dots\dots (2.22)$$

a. Aliran Laminar

Aliran laminar adalah aliran yang memiliki *Reynolds Number* < 2300. Perpindahan panas yang terjadi pada aliran internal dapat dilihat pada dua kondisi yaitu saat fluks permukaan konstan dan pada saat temperatur permukaan konstan. Pada aliran internal yang melalui *circular tube* dengan *uniform surface heat flux* dan *fully developed condition* (laminar) maka nilai *Nusselt number* konstan. Nilai *Nusselt number* tidak bergantung pada *Re*, *Pr*, dan *axial location*. *Nusselt number* untuk aliran laminar dapat diperoleh dengan persamaan:

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 4.36(q'' \text{ konstan}) \dots\dots\dots (2.23)$$

$$Nu_D = 3.66 (T_s \text{ konstan}) \dots\dots\dots (2.24)$$

b. Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah aliran yang memiliki nilai *Reynolds Number* > 2300. Berdasarkan persamaan *Dittus-Boelter*, nilai *Nusselt Number* pada aliran turbulen dapat dihitung dengan persamaan:

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana,

n = 0,4 untuk *heating* ( $T_s > T_m$ )

n = 0,3 untuk *cooling* ( $T_s < T_m$ )

Dengan korelasi,

$$\left[ \begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re_D \geq 10,000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right] \text{ semua properti fluida diukur pada } T_m.$$

Sedangkan koefisien konveksi dihitung dari persamaan berikut ini,

$$h_{i \text{ tube}} = \frac{Nu_{D \text{ tube}} k_c}{d_i} \dots\dots\dots (2.26)$$

Keterangan :

$Nu_D$  = *Nusselt number*

$Re_D$  = *Reynold number*

$Pr$  = *Prandtl number*

$h_{i \text{ tube}}$  = koefisien konveksi *tube*

$k$  = *thermal conductivity*

### 2.3.4 Analisis Pressure Drop

#### ➤ Pressure Drop pada Sisi Shell

*Pressure drop* yang terjadi pada sisi *shell* dibagi kedalam tiga bagian yang berbeda, yaitu *pressure drop* zona *subcooled*, *condensing*, dan *desuperheating*. Zona

*subcooled* dan *desuperheating* menggunakan perumusan yang sama untuk mendapatkan nilai dari penurunan tekanan. Namun, zona *condensing* menggunakan rumus yang berbeda. Hal ini disebabkan pada daerah *condensing* fluidanya berada dalam fase *mixture* atau campuran.

*Pressure drop* untuk daerah *desuperheating* dan *subcooling* dicari dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta P_{\text{zona}} = N_L X \left( \frac{\rho_{\text{zona}} v_{\text{max}}^2}{2} \right) f \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana :

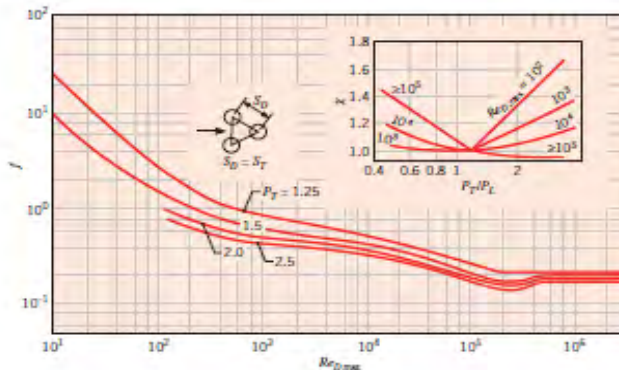
$\Delta P_{\text{sub}}$  : *pressure drop* pada zona (*desuperheating* atau *subcooling*)

$N_L$  : jumlah *tube* pada arah longitudinal

$X$  : faktor koreksi

$f$  : faktor gesek

Nilai  $X$  dan  $f$  dicari dari grafik dibawah ini.



Gambar 2.18 Grafik faktor gesek  $f$  dan faktor koreksi  $X$  untuk susunan *tube bundle staggered*.

(Sumber: “Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition”)

$P_T$  dan  $P_L$  secara berturut-turut merupakan pitch transversal dan longitudinal yang tidak berdimensi.  $P_T = S_T/d_o$  dan  $P_L = S_L/d_o$ .

*Pressure drop* untuk zona *condensing* dicari dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta P_{\text{cond}} = \frac{1}{2} \frac{f G_s^2 D_s (N+1)}{5.22 \times 10^{10} D_e s} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana :

- $f$  : faktor gesek
- $G_s$  : kecepatan massa *shell*
- $D_s$  : *inner diameter shell*
- $N + 1$  : jumlah *crosses*
- $D_e$  : diameter ekuivalen untuk perpindahan panas dan *pressure drop*
- $s$  : gravitasi spesifik

#### ➤ ***Pressure Drop pada Sisi Tube***

Penurunan tekanan pada *tube* dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu *pressure drop major* ( $\Delta p_{\text{major}}$ ) dan *pressure drop minor* ( $\Delta p_{\text{minor}}$ ). *Pressure drop major* merupakan *pressure drop* yang terjadi pada pipa atau *tube* lurus. Sedangkan *pressure drop minor* terjadi pada perubahan penampang pipa, belokan pipa, masuk dan keluar pipa, dst. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan penurunan tekanan *major* pada *tube* adalah:

$$\Delta P_{\text{major}} = f \frac{L_{\text{tube}}}{d_i} \frac{\rho v^2}{2} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dimana :

- $f$  : faktor friksi pada *moody diagram*
- $\rho$  : massa jenis fluida
- $v$  : kecepatan fluida
- $L_{\text{tube}}$  : panjang efektif *tube*
- $d_i$  : diameter dalam *tube*

Sedangkan *pressure drop minor* didapat dari persamaan,



$$\Delta P_{\text{minor}} = k \frac{1}{2} \rho v^2 \dots\dots\dots (2.30)$$

Dimana :

k : konstanta yang bergantung dari bentuk *tube / pipa*, seperti *sudden contraction* atau *entrance* maupun *exit*.

### 2.3.5 Analisis Perpindahan Panas dengan Metode *Number of Transfer Unit* (NTU)

Metode ini digunakan untuk mengetahui unjuk kerja dari *heat exchanger*. Untuk mengetahui unjuk kerja suatu *heat exchanger*, maka harus diketahui dahulu nilai laju perpindahan maksimum ( $q_{\text{maks}}$ ) pada *heat exchanger* tersebut.

$$C_c < C_h: q_{\text{max}} = C_c (T_{h,i} - T_{c,i}) \dots\dots\dots (2.31)$$

$$C_h < C_c: q_{\text{max}} = C_h (T_{h,i} - T_{c,i}) \dots\dots\dots (2.32)$$

$$q_{\text{max}} = C_{\text{min}} (T_{h,i} - T_{c,i}) \dots\dots\dots (2.33)$$

Nilai effectiveness ( $\varepsilon$ ) adalah perbandingan antara laju perpindahan panas *heat exchanger* dengan laju perpindahan panas maksimum yang dimungkinkan.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\text{max}}} \dots\dots\dots (2.34)$$

*Effectiveness* merupakan bilangan tanpa dimensi yang nilainya berada dalam batas  $0 < \varepsilon < 1$ . Untuk semua *heat exchanger*, nilai *effectiveness* dapat dinyatakan,

$$\varepsilon = f(\text{NTU}, \text{Cr}) \dots\dots\dots (2.35)$$

$$\varepsilon = f\left(\text{NTU} \frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{maks}}}\right) \dots\dots\dots (2.36)$$

Pada beberapa permasalahan, nilai temperatur outlet tidak dapat diperoleh sehingga untuk melakukan analisis efektifitas *heat exchanger* digunakan *dimensionless parameter* yaitu *number of transfer unit* (NTU).

$$\text{NTU} = \frac{UA}{C_{\text{min}}} \dots\dots\dots (2.37)$$

Dimana  $C_{\min}$  dapat diperoleh dengan mencari nilai terkecil dari  $C_c$  dan  $C_h$  yaitu:

$$C_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \dots\dots\dots (2.38)$$

$$C_h = \dot{m}_h \cdot C_{p_h} \dots\dots\dots (2.39)$$

Dengan menggunakan *dimensionless parameter* (NTU) maka efektifitas dari *heat exchanger* tipe *shell and tube* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp\left[-(NTU)(1 + C_r^2)^{1/2}\right]}{1 - \exp\left[-(NTU)(1 + C_r^2)^{1/2}\right]} \right\}^{-1} \dots\dots\dots (2.40)$$

Keterangan :

- $\varepsilon$  = *effectiveness* dari *heat exchanger*
- $q$  = laju perpindahan panas aktual yang terjadi
- $q_{\max}$  = laju perpindahan panas maksimal yang dapat terjadi
- $C_c$  = *specific heat capacity* untuk fluida dingin
- $C_h$  = *specific heat capacity* untuk fluida panas
- $C_{\min}$  = *specific heat capacity* paling kecil

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB III METODOLOGI**

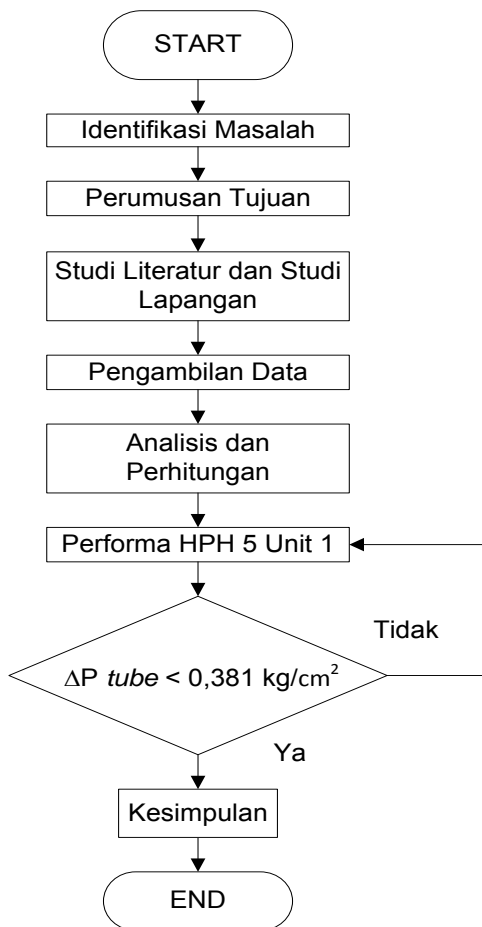
*High Pressure Heater* (HPH 5) PLTU Unit 1 PT. PJB UP Gresik merupakan salah satu *heat exchanger* jenis dari *shell and tube*. yang berfungsi untuk meningkatkan performa dan efisiensi unit pembangkit serta mengurangi efek thermal yang terjadi di dalam *boiler*.

Pada tugas akhir ini, *redesign* pada HPH 5 dilakukan dengan menggunakan pendekatan analisa termodinamika dan perpindahan panas. Metode yang digunakan yaitu metode LMTD dan NTU. Data-data yang digunakan dalam perhitungan merupakan data-data yang didapat dari data *log sheet* pada PLTU Unit 1 PT. PJB UP Gresik, *calculation sheet*, serta *instruction mannual book*. Dalam melakukan *redesign*, terdapat beberapa referensi digunakan sebagai acuan, yaitu *textbook Fundamental Engineering of Thermodynamics*, Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro; *Fundamental of Heat and Mass Transfer*, Incropera, DeWitt, Bergman, dan Lavine dan referensi-referensi lainnya.

### **3.1 Alur Pelaksanaan Penelitian**

Tugas akhir tentang analisis perhitungan perpindahan panas pada HPH memiliki beberapa tahap proses pengerjaan. Pertama, identifikasi masalah. Pada tahapan awal identifikasi dilakukan pengamatan terhadap masalah yang dirumuskan menjadi tujuan dari penelitian. Penulis melakukan studi literatur dan studi lapangan tentang HPH Dengan melakukan studi literatur dan studi lapangan terhadap HPH penulis kemudian menentukan materi analisis yang diminati oleh penulis. Proses analisis membutuhkan data-data guna mendapatkan hasil perhitungan perpindahan panas *feedwater heater*. Setelah studi literatur dan lapangan mengenai, penulis kemudian mulai melakukan pengambilan data spesifikasi HPH dan data pendukung pada PLTU Unit 1 PT. PJB UP Gresik. Data yang terkumpul digunakan untuk melakukan analisis perhitungan perpindahan

panas HPH. Analisis dilakukan dengan melakukan perhitungan koefisien *overall heat transfer* (U), metode LMTD, *Nusselt Number*, *pressure drop* dan unjuk kerja *heat exchanger* dengan metode NTU-ε. Yang terakhir yaitu kesimpulan, tahapan ini merupakan ujung dari perhitungan dan analisis perpindahan panas di HPH, yaitu dengan menarik kesimpulan yang didapat dari hasil perhitungan.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Perancangan HPH 5 dengan metode LMTD

Step-step yang digunakan dalam perancangan HPH 5 dengan metode LMTD adalah sebagai berikut :

1. Mencari *properties* fluida dingin dan fluida panas setelah itu mencari  $q_{hot}$ ,  $q_{cold}$ , dan  $q$  masing-masing zona.
2. Menghitung  $\Delta T_{LMTD}$  dan mencari jumlah *tube*.
3. Melakukan variasi kecepatan fluida sisi *tube* dan menghitung *pressure drop* yang terjadi. *Pressure drop* dan kecepatan merupakan batasan dalam merancang HPH 5 ini.
4. Mencari dimensi zona *desuperheating*, zona *condensing*, dan zona *subcooling*, serta diameter dalam *shell*.
5. Menghitung  $h_{odesup}$ ,  $h_{ocond}$ ,  $h_{osub}$  dan  $h_{i_{tube}}$ .
6. Mencari  $U_{desup}$ ,  $U_{cond}$ , dan  $U_{sub}$ .
7. Menghitung *pressure drop* pada zona *desuperheating*, zona *condensing*, zona *subcooling*.
8. Setelah ke tujuh tahap ini selesai maka baru design optimalnya bisa ditentukan.

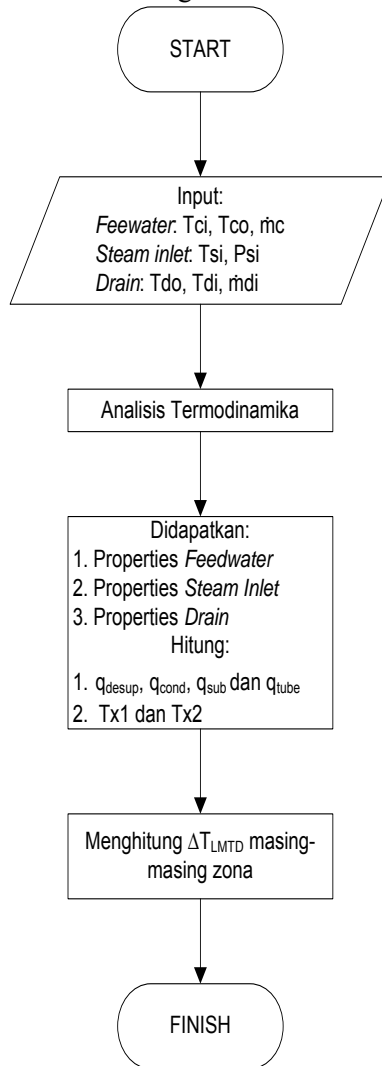
### 3.3 Perancangan HPH 5 dengan Metode NTU

Setelah mendapatkan design optimal HPH 5 dengan metode LMTD maka tahap selanjutnya yaitu menghitung nilai *effectiveness* dari HPH 5 ini dengan metode NTU. Adapun tahapan-tahapannya adalah sebagai berikut.

1. Menghitung nilai  $C_{hot}$  dan  $C_{cold}$  dan menentukan  $C_{min}$  dan  $C_{max}$  nya.
2. Menghitung nilai  $Cr$ .
3. Mencari  $U_{tot}$  dan  $h_o$ .
4. Memvariasikan *plugging* pada *tube* mulai 0 %-10 % *plugging*.
5. Menghitung nilai NTU dan *effectivenessnya*.

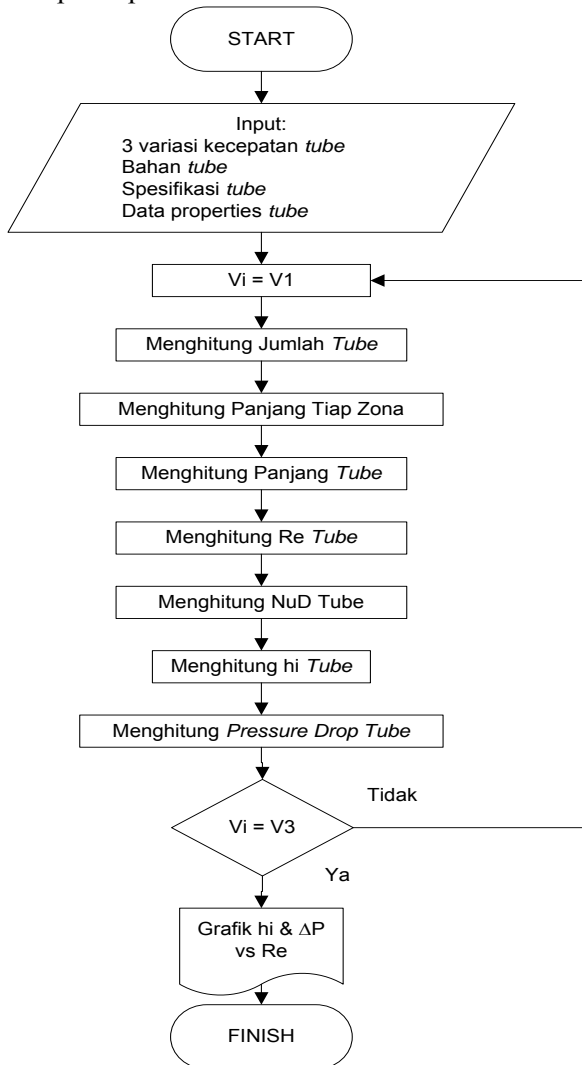
### 3.4 Perancangan HPH 5

#### a. Perpindahan Panas dengan Metode LMTD



Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan Perpindahan Panas dengan Metode LMTD

- b. Perpindahan Panas Internal (Sisi *Tube*), dengan variasi kecepatan pada *tube*.

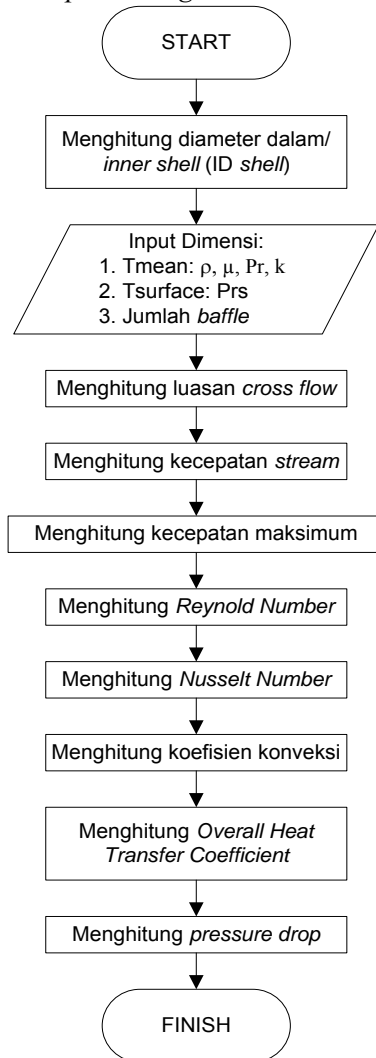


Gambar 3.3 Diagram Alir Perhitungan Perpindahan Panas Internal



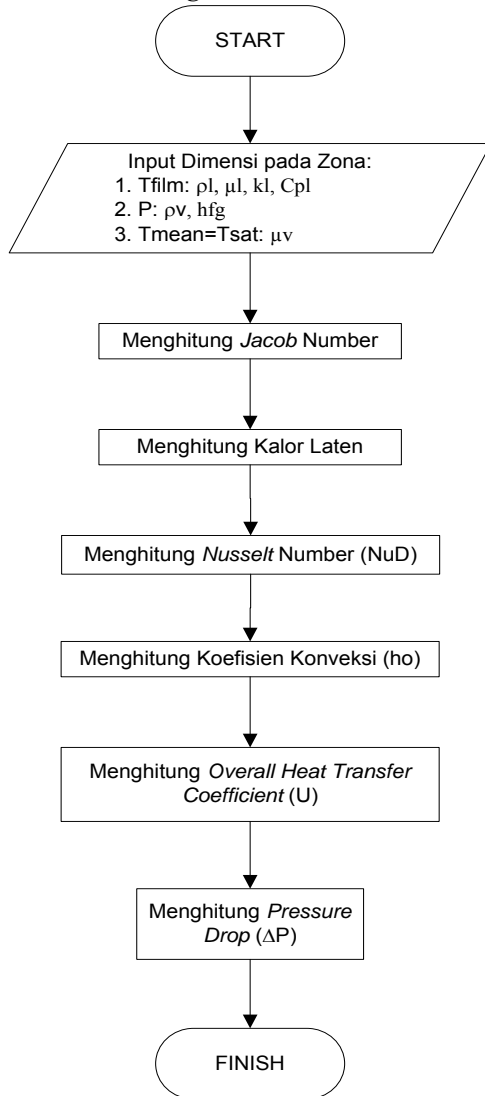
c. Perpindahan Panas Eksternal (Sisi *Shell*)

1) Zona *Desuperheating* dan Zona *Subcooling*



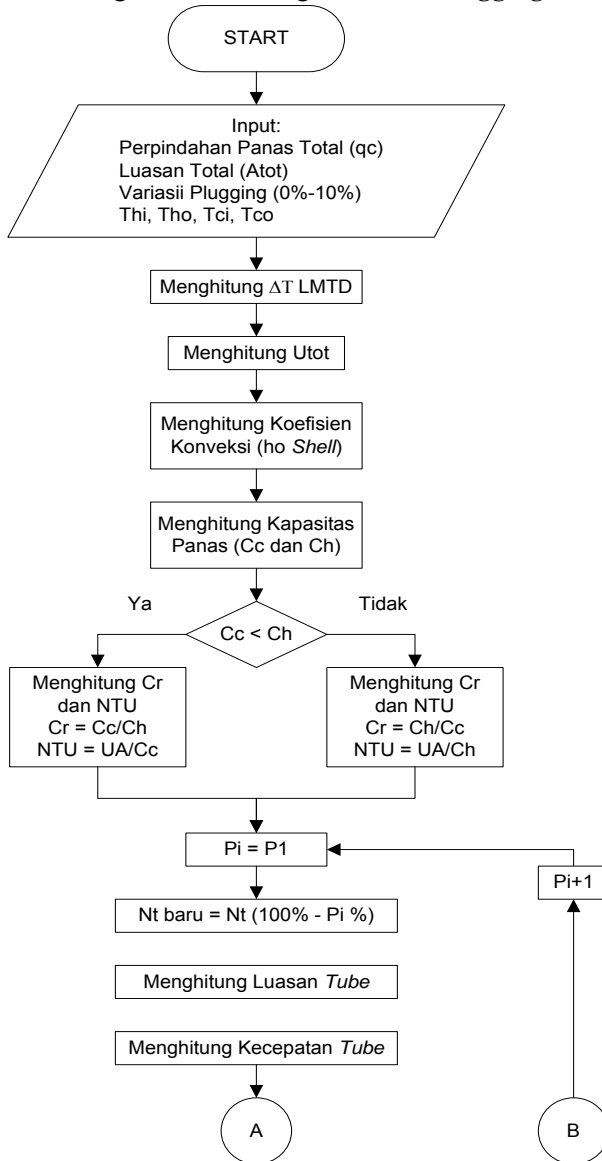
Gambar 3.4 Diagram Alir Perhitungan Perpindahan Panas pada Zona *Desuperheating* dan Zona *Subcooling*

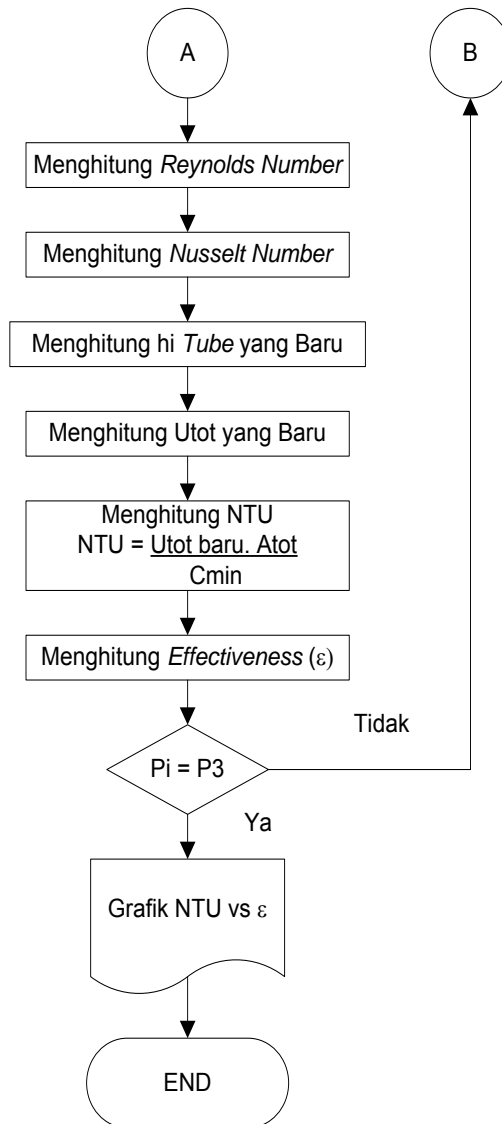
## 2) Zona Condensing



Gambar 3.5 Diagram Alir Perhitungan Perpindahan Panas pada Zona *Condensing*

d. Perhitungan NTU- $\epsilon$  dengan Variasi *Plugging*





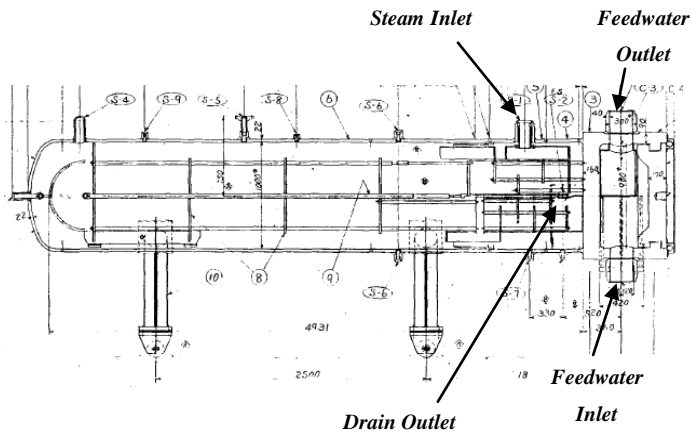
Gambar 3.6 Diagram Alir Perhitungan NTU- $\epsilon$  dengan Variasi *Plugging*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Termodinamika

Proses re-design pada *High Pressure Heater* (HPH) 5 PT. PJB. UP Gresik ini dilakukan dengan menggunakan proses analisis Termodinamika dan Perpindahan Panas. Pada HPH 5 terdapat 2 *inlet* berupa *steam inlet* (fluida panas pada sisi *shell*) yang merupakan uap ekstraksi dari turbin dan *inlet feedwater* yang berasal dari HPH 4 serta terdapat *outlet feedwater* (fluida dingin pada sisi *tube*) yang akan menuju ke *economizer* dan *outlet drain* akan menuju ke HPH 4. *Control volume* pada HPH 5 dapat ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 *Control Volume* HPH 5

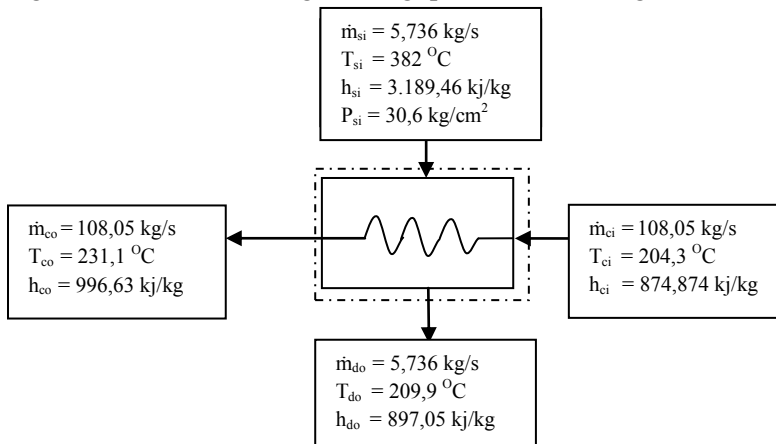
(Sumber: “*Instruction Manual*”)

Dalam proses re-design perlu adanya data-data awal sebagai inputan. Data-data didapatkan dari data desain HPH 5 yang ada di *instruction manual book* dan *calculation sheet* HPH 5. Berikut data-data awal yang digunakan:

Tabel 4.1 Properties Fluida pada HPH 5

| Properties Fluida                                   | Shell (Fluida Panas) |             | Tube (Fluida Dingin) |        |
|---|----------------------|-------------|----------------------|--------|
|   | Inlet                | Outlet      | Feedwater            |        |
|   | Steam                | Drain HPH 5 | Inlet                | Outlet |
| Laju alir massa ( $\dot{m}$ ) (kg/s)                | 5,736                |             | 108,05               |        |
| Tekanan (P) (kg/cm <sup>2</sup> )                   | 30,6                 |             |                      |        |
| Temperatur (T) (°C)                                 | 382                  | 209,9       | 204,3                | 231,1  |
| Entalphi (h) (kJ/kg)                                | 3.189,46             | 897,05      | 874,874              | 996,63 |
| Mean Spesific Heat (C <sub>p</sub> ) (kJ/kg.K)      |                      |             | 4,54                 |        |
| Pressur e drop yang diijinkan (kg/cm <sup>2</sup> ) |                      |             | 0,381                |        |

Dari data properties fluida pada tabel 4.1 maka dapat digambarkan kesetimbangan energi pada HPH 5 sebagai berikut:



Gambar 4.2 Neraca Massa dan Kalor pada HPH 5

Analisis secara termodinamika dilakukan pada kondisi *steady state*. Persamaan konversi energi pada HPH 5 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}Q_{\text{out}} &= Q_{\text{in}} \\Q_{\text{hot}} &= Q_{\text{cold}} \\ \dot{m}_{\text{hot}} \cdot \Delta h &= \dot{m}_{\text{cold}} \cdot C_{p,\text{cold}} \cdot \Delta T \\ \dot{m}_{\text{hot}} \cdot (h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) &= \dot{m}_{\text{cold}} \cdot C_{p,\text{cold}} \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})\end{aligned}$$

Pada persamaan di atas dapat diketahui besaran  $Q_{\text{hot}}$  dan  $Q_{\text{cold}}$  beserta  $Q$  masing-masing zona, sebagai berikut:

- Laju Perpindahan Panas Fluida Panas Sisi *Shell*  

$$\begin{aligned}Q_{\text{hot}} &= \dot{m}_{\text{hot}} \cdot (h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) \\ &= 5,736 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left( 3.189,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 897,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \\ &= 13.149,26\end{aligned}$$
- Laju Perpindahan Panas Fluida Dingin Sisi *Tube*  

$$\begin{aligned}Q_{\text{cold}} &= \dot{m}_{\text{c}} \cdot C_{p,\text{c}} \cdot (T_{\text{co}} - T_{\text{ci}}) \\ &= 108,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,54 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (504,1 - 477,3) \text{ K} \\ &= 13.146,66 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}\end{aligned}$$

Kemudian dilakukan perhitungan laju perpindahan panas masing-masing zona pada *shell*. Sebelum menghitung laju perpindahan panas, terlebih dahulu mencari properties dari fluida yang mengalir pada *shell*. Dari Table A.3 Properties of Saturated Water (Liquid– Vapor): Pressure Table, didapatkan properties fluida sebagai berikut:

$$P_{\text{shell}} = 30,6 \text{ kg/cm}^2 = 30 \text{ bar}$$

Keterangan: Berdasarkan data desain pada HPH 5,  $P = 30,6 \text{ kg/cm}^2$  digunakan untuk pemanasan (*heating*) pada *shell*, sedangkan data tekanan *shell side* sebesar  $41 \text{ kg/cm}^2$  digunakan untuk menentukan kekuatan material dari *shell* dalam menahan tekanan.

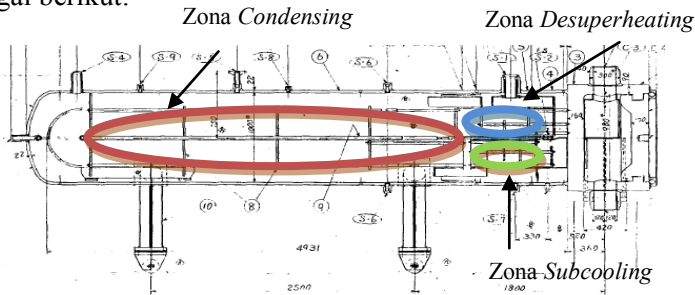
$$T_{\text{sat}} = 233,9 \text{ }^{\circ}\text{C} = 506,9 \text{ K}$$

$$h_{\text{f}} = 1.008,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{g}} = 1.795,7 \text{ kJ/kg}$$



Analisis termodinamika pada masing-masing zona adalah sebagai berikut:



Gambar 4.3 Pembagian Zona HPH 5

(Sumber: "Instruction Manual")

- Laju perpindahan panas zona *desuperheating*

$$\begin{aligned} Q_{\text{desup}} &= \dot{m}_{\text{si}} \cdot (h_{\text{si}} - h_{\text{g}}) \\ &= 5,736 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left( 3.189,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1.795,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \\ &= 5,736 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1.393,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 7.994,61 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

- Laju perpindahan panas zona *condensing*

$$\begin{aligned} Q_{\text{cond}} &= \dot{m}_{\text{si}} \cdot (h_{\text{g}} - h_{\text{f}}) \\ &= 5,736 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left( 1.795,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1.008,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 4.515,95 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

- Laju perpindahan panas zona *subcooling*

$$\begin{aligned} Q_{\text{sub}} &= \dot{m}_{\text{s}} \cdot (h_{\text{f}} - h_{\text{do}}) \\ &= 5,736 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left( 1.008,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 897,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 638,7036 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

- Nilai  $Q_{\text{hot}}$  dari ketiga zona:

$$\begin{aligned} Q_{\text{hot}} &= Q_{\text{desup}} + Q_{\text{cond}} + Q_{\text{sub}} \\ &= 7.994,61 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 4.515,95 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 638,7036 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 13.149,26 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

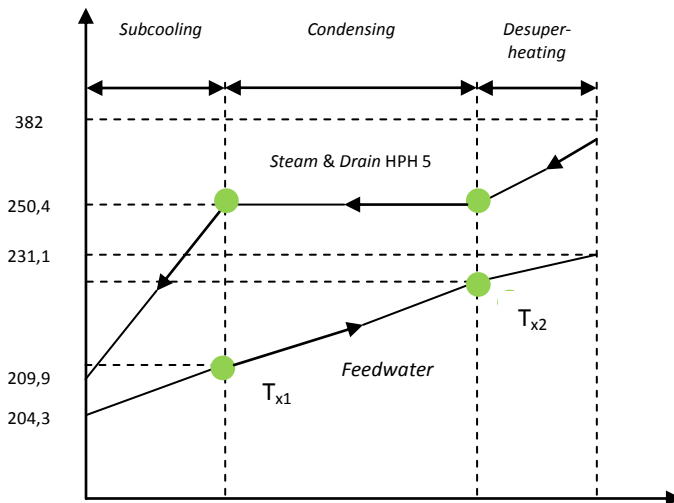
Nilai  $Q_{\text{hot}}$  ( $Q_{\text{shell}}$ ) dan  $Q_{\text{cold}}$  ( $Q_{\text{tube}}$ ) di atas berbeda, padahal jika berdasar *balance energy*, seharusnya nilai  $Q_{\text{hot}}$  dan  $Q_{\text{cold}}$  sama. Hal ini dimaksudkan untuk mengantisipasi adanya *losses* panas pada bagian dinding *shell*. Dengan nilai  $Q_{\text{hot}}$  yang lebih tinggi diharapkan walaupun ada *losses*,  $Q_{\text{hot}}$  yang ditransferkan tetap

sama dengan jumlah  $Q_{\text{cold}}$  yang diterima. Jika tidak di desain demikian maka ditakutkan  $Q_{\text{cold}}$  yang diterima akan lebih kecil dari yang seharusnya yang pada akhirnya akan menurunkan efisiensi dari HPH 5.

## 4.2 Analisis Perpindahan Panas

### 4.2.1 Analisis Perpindahan Panas dengan Metode *Log Mean Temperatur Difference* (LMTD)

Analisis HPH 5 dengan metode LMTD dilakukan dengan menghitung besarnya  $\Delta T_{\text{LMTD}}$  masing-masing zona pada HPH 5. Analisis dilakukan dengan melakukan pendekatan terhadap karakteristik aliran pada HPH 5 yaitu *cross flow*. Dari grafik distribusi temperatur HPH 5 dapat dilihat distribusi temperatur aliran fluida panas dan fluida dingin yang mengalir di dalam HPH. Pada sisi *shell* terjadi perubahan fasa uap menjadi fasa cair, sedangkan sisi *tube* tidak mengalami perubahan fasa, hanya mengalami perubahan temperatur. Berikut ini adalah distribusi temperatur pada HPH 5:



Gambar 4.4 Grafik Distribusi Temperatur pada HPH 5

Dari gambar dapat dihitung  $\Delta T_{LMTD}$  tiap zona, sebelum menghitung  $\Delta T_{LMTD}$  tersebut menghitung besar  $T_{x1}$  dan  $T_{x2}$  menggunakan persamaan sebagai berikut:

- Nilai  $T_{x1}$

$$Q_{sub(shell)} = Q_{sub(tube)}$$

$$Q_{sub(shell)} = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{x1} - T_{ci})$$

$$638,7036 \frac{kJ}{s} = 108,05 \frac{kg}{s} \cdot 4,54 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (T_{x1} - 477,3) K$$

$$T_{x1} = 478,6 K$$

$$= 205,6 ^\circ C$$
- Nilai  $T_{x2}$

$$Q_{desup(shell)} = Q_{desup(tube)}$$

$$Q_{desup(shell)} = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{co} - T_{x2})$$

$$7.994,61 \frac{kJ}{s} = 108,05 \frac{kg}{s} \cdot 4,54 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (504,1 - T_{x2}) K$$

$$T_{x2} = 487,8 K$$

$$= 214,8 ^\circ C$$

Setelah itu menghitung faktor koreksi LMTD untuk *shell and tube* dengan kelipatan 2 laluan *tube*, yaitu:

Faktor koreksi untuk F

$$R = \frac{T_i - T_o}{t_o - t_i} = \frac{382 - 209,9}{231,1 - 204,3} = 6,42$$

$$P = \frac{t_o - t_i}{T_i - t_i} = \frac{231,1 - 204,3}{382 - 204,3} = 0,15$$

maka  $F = 0,5$

Besarnya  $\Delta T_{LMTD}$  tiap zona dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

- $\Delta T_{LMTD}$  Zona *Desuperheating*

$$\Delta T_{LMTD des} = \Delta T_{LM, CF} \times F$$

$$= \frac{(T_{si} - T_{co}) - (T_{sat} - T_{x2})}{\ln \left( \frac{T_{si} - T_{co}}{T_{sat} - T_{x2}} \right)} \times F$$

$$= \frac{(655 - 504,1)K - (506,9 - 487,8)K}{\ln \left( \frac{655 - 504,1}{506,9 - 487,8} \right)K} \times 0,5$$

$$= 63,77 \text{ K} \times 0,5 = 31,88 \text{ K}$$

- $\Delta T_{\text{LMTD Zona Condensing}}$

$$\begin{aligned}\Delta T_{\text{LMTD cond}} &= \Delta T_{\text{LM, CF}} \times F \\ &= \frac{(T_{\text{sat}} - T_{x2}) - (T_{\text{sat}} - T_{x1})}{\ln\left(\frac{T_{\text{sat}} - T_{x2}}{T_{\text{sat}} - T_{x1}}\right)} \times F \\ &= \frac{(506,9 - 487,8) \text{ K} - (506,9 - 478,6) \text{ K}}{\ln\left(\frac{506,9 - 487,8}{506,9 - 478,6}\right) \text{ K}} \times 0,5 \\ &= 23,59 \text{ K} \times 0,5 \\ &= 11,79 \text{ K}\end{aligned}$$

- $\Delta T_{\text{LMTD Zona Subcooling}}$

$$\begin{aligned}\Delta T_{\text{LMTD sub}} &= \Delta T_{\text{LM, CF}} \times F \\ &= \frac{(T_{\text{sat}} - T_{x1}) - (T_{\text{do}} - T_{\text{ci}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{sat}} - T_{x1}}{T_{\text{do}} - T_{\text{ci}}}\right)} \times F \\ &= \frac{(523,4 - 478,6) \text{ K} - (482,9 - 477,3) \text{ K}}{\ln\left(\frac{523,4 - 478,6}{482,9 - 477,3}\right) \text{ K}} \times 0,5 \\ &= 39,2 \text{ K} \times 0,5 \\ &= 18,85 \text{ K}\end{aligned}$$

#### 4.2.2 Analisis Perpindahan Panas Internal (Sisi Tube)

Analisis perpindahan panas internal pada *tube* dilakukan untuk mendapatkan dimensi *tube* berupa diameter luar ( $d_o$ ), diameter dalam ( $d_i$ ), jumlah *tube* yang dibutuhkan, panjang masing-masing zona kecepatan optimal aliran *feedwater* pada *tube* dan koefisien konveksi pada *tube*. Nilai koefisien konveksi pada *tube* ( $h_i$ ) dihitung berdasarkan kecepatan optimal aliran *feedwater* pada *tube*. Pada perpindahan panas internal, akan divariasikan kecepatan *feedwater* (kecepatan sisi *tube*). Semakin besar kecepatan aliran fluida di dalam *tube* maka nilai perpindahan panasnya juga semakin besar. Besarnya *pressure drop* juga meningkat seiring peningkatan nilai perpindahan panas. Variasi kecepatan *tube* yang digunakan dalam perhitungan dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Variasi Kecepatan *Feedwater* pada *Tube*

| No | V(m/s) | Keterangan                                    |
|----|--------|---|
| 1  | 1,799  | Data Desain HPH 5                             |
| 2  | 2,1    | Kecepatan Variasi                             |
| 3  | 2,44   | Kecepatan limitasi agar tidak terjadi vibrasi |

Kecepatan 2.44 m/s merupakan batas kecepatan yang tidak menyebabkan vibrasi pada *U-tube bundle*. Ini berdasar dari jurnal “*Feedwater Heater Application of T-22 Tubing*”.

- Perhitungan Dimensi *Tube*

Dimensi *tube* diperoleh dari data konstruksi HPH 5. Bahan *tube* yang digunakan yaitu *carbon steel*.

$$d_{o,tube} = 0,016 \text{ m}$$

$$= 0,6299 \text{ in}$$

$$\text{Tebal tube} = 0,0018 \text{ m}$$

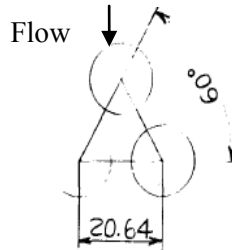
$$= 0,070866 \text{ in}$$

Dari table Dimensional Data for Commercial Tubing didapat  $d_{i,tube} = 0,481 \text{ in} = 0,012 \text{ m}$  dengan pendekatan tebal *tube* sebesar 0,072 in. Sedangkan nilai koefisien konduksi dinding *tube* dapat dicari dengan menggunakan temperature *surface tube* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 T_s &= \frac{\frac{(T_{ci}+T_{co})}{2} + \frac{(T_{hi}+T_{do})}{2}}{2} \\
 &= \frac{\frac{(477,3+504,1)K}{2} + \frac{(655+482,9)K}{2}}{2} \\
 &= 529,825 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Sehingga dari Table A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solid dengan bahan *tube carbon steel* didapat harga  $k_{tubewall} = 52,27 \text{ W/mK}$ .

*Layout tube* yang digunakan dalam perancangan adalah sebagai berikut :



Gambar 4.5 *Layout Tube* HPH 5

(Sumber: "PT. PJB, UP. Gresik")

$$S_T = 20,64 \text{ mm} = 0,02064 \text{ m}$$

$$S_D = 20,64 \text{ mm} = 0,02064 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} S_L &= \sqrt{S_D^2 - (S_T : 2)^2} \\ &= \sqrt{20,64^2 - 10,32^2} \\ &= 17,87 \text{ mm} = 0,01787 \text{ m} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, dapat diketahui spesifikasi *tube* pada HPH 5. Berikut ini adalah tabel spesifikasi *tube* pada HPH 5:

Tabel 4.3 Spesifikasi *Tube* pada HPH 5

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| Diamameter Luar ( $d_o$ )    | 0,016 m   |
| Diameter Dalam ( $d_i$ )     | 0,012 m   |
| Transversal Pitch ( $S_T$ )  | 0,02064 m |
| Longitudinal Pitch ( $S_L$ ) | 0,01787 m |
| Diagonal Pitch ( $S_D$ )     | 0,02064 m |
| Thickness ( $t$ )            | 0,0018 m  |
| Jumlah <i>Tube</i>           | 531       |

- Panjang Masing-Masing Zona

Diketahui luas perpindahan panas pada masing-masing zona (Data dari *calculation sheet* HPH 5):

$$A_{desuperheating} : 22,7 \text{ m}^2$$

$$A_{condensing} : 209,9 \text{ m}^2$$

$$A_{subcooling} : 24,0 \text{ m}^2$$

Maka panjang masing-masing zona,

1. Zona *Desuperheating*

$$L_{\text{desup}} = \frac{A_{\text{desup}}}{d_o N_t} = \frac{22,7 \text{ m}^2}{x0,016 \text{ m} \times 531} = 0,851 \text{ m}$$

2. Zona *Condensing*

$$L_{\text{cond}} = \frac{A_{\text{cond}}}{d_o N_t} = \frac{209,9 \text{ m}^2}{x0,016 \text{ m} \times 531} = 7,864 \text{ m}$$

3. Zona *Subcooling*

$$L_{\text{sub}} = \frac{A_{\text{sub}}}{d_o N_t} = \frac{24,0 \text{ m}^2}{x0,016 \text{ m} \times 531} = 0,899 \text{ m}$$

- Maka total panjang *tube* keseluruhan adalah

$$\begin{aligned} L_{\text{tube}} &= L_{\text{desup}} + L_{\text{cond}} + L_{\text{sub}} \\ &= 0,851 \text{ m} + 7,864 \text{ m} + 0,899 \text{ m} \\ &= 9,614 \text{ m} \end{aligned}$$

- Koefisien Konveksi pada *Tube*

Sebelum menghitung koefisien konveksi pada *tube* terlebih dahulu harus mengetahui properties fluida yang mengalir di sisi *tube* dengan menggunakan temperatur rata-rata serta mengetahui kecepatan *tube* yang digunakan. Dengan melakukan interpolasi Table A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water, didapatkan data:

$$\begin{aligned} T_{\text{mean,tube}} &= \frac{T_{\text{ci}} + T_{\text{co}}}{2} = \frac{(477,3 + 504,1) \text{ K}}{2} \\ &= 490,7 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\rho_c = 843,65 \text{ kg/cm}^3$$

$$\mu_c = 123,58 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$\text{Pr}_c = 0,851$$

$$k_c = 650,37 \times 10^{-3} \text{ W/m.K}$$

Koefisien konveksi dapat dihitung dengan mengetahui *Reynolds Number* dan *Nusselt Number* terlebih dahulu.

- *Reynolds Number*

$$\begin{aligned} \text{Re}_{D, \text{tube}} &= \frac{\rho_c v_{\text{tube}} d_{i, \text{tube}}}{\mu} \\ &= \frac{843,65 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 1,799 \frac{\text{m}}{\text{s}} 0,012 \text{ m}}{123,58 \times 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}}} \\ &= 147.375,92 \end{aligned}$$

- *Nusselt Number*

$$\begin{aligned} \text{Nu}_D &= 0,023 \text{Re}_{D, \text{tube}}^{4/5} \text{Pr}_{\text{tube}}^{0,4} \\ &= 0,023 (147.375,92)^{4/5} 0,851^{0,4} \\ &= 293,93 \end{aligned}$$

- Koefisien Konveksi

$$\begin{aligned} h_{i, \text{tube}} &= \frac{\text{Nu}_{D, \text{tube}} k_c}{d_{i, \text{tube}}} \\ &= \frac{293,93 \times 650,37 \times 10^{-3} \text{ W/mK}}{0,012 \text{ m}} \\ &= 15.930,27 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

- *Pressure Drop Sisi Tube*

*Pressure drop* internal terdiri dari *major losses* dan *minor losses*. *Major losses* diakibatkan oleh adanya gesekan di internal *tube*. Nilai kekasaran *tube* ( $e$ ) diperoleh 0,046 mm dengan bahan *tube carbon steel* (baja paduan). Sedangkan nilai koefisien gesek *tube* ( $f$ ) dapat dicari pada gambar *Moody Diagram* dengan kekasaran *tube* fungsi *reynolds number*. Berikut ini adalah contoh perhitungan *pressure drop* sisi *tube* dengan kecepatan *feedwater* 1,799 m/s dan panjang *tube* 9,614 m.

- *Major Losses*

Sebelum menghitung *major losses*, terlebih dahulu menghitung nilai koefisien gesek pada *tube*.

$$\text{Kekasaran relatif} = \frac{e}{d_i} = \frac{0,046 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 0,00383$$



Dengan  $Re_{D,tube} = 147.375,92$  dan nilai kekasaran relative ( $e/d_i$ ) = 0,00383 didapatkan harga  $f = 0,028$ . *Major losses* dapat dihitung dengan,

$$\begin{aligned}\Delta P_{major} &= f \frac{L_{tube}}{d_{i,tube}} \frac{\rho_c V_{tube}^2}{2} \\ &= 0,028 \frac{9,614 \text{ m}}{0,012 \text{ m}} \frac{843,65 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (1,799 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} \\ &= 30.624,96105 \text{ Pa}\end{aligned}$$

- *Minor Losses*

Dari tabel 8.2 didapatkan nilai  $k$  akibat bentuk *entrance* sebesar 0,5 dan akibat *exit* sebesar 1. Sedangkan pada u-bend nilai  $k$  jenis *return bend* pada  $180^\circ$  adalah 0,2.

$\Delta P_{minor}$  terdiri dari  $\Delta P_{minor,entrance}$ ,  $\Delta P_{minor,exit}$ , dan  $\Delta P_{minor,return,bend}$  sehingga perlu dihitung masing-masing nilai *pressure drop* tersebut yaitu:

$$\Delta P_{minor} = k \frac{v^2}{2}$$

Tabel 4.4 Perhitungan *Pressure Drop* Sisi Internal Akibat *Minor Losses*

|   | Akibat<br>Entrance | Akibat<br>Exit | Akibat<br>Bend |
|---|--------------------|----------------|----------------|
| <b>K</b>  | 0,5                | 1              | 0,2            |
| <b><math>\rho_c</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>           | 843,65             | 843,65         | 843,65         |
| <b><math>V_{tube}</math> (m/s)</b>                      | 1,799              | 1,799          | 1,799          |
| <b><math>\Delta P_{minor}</math> (Pa)</b>               | 682,59             | 910,13         | 273,04         |
| <b><math>\Delta P_{minor \text{ total}}</math> (Pa)</b> | 1.865,76           |                |                |

- *Total Pressure Drop pada Tube*

$$\begin{aligned}\Delta P_{tube} &= \Delta P_{mayor} + \Delta P_{minor} \\ &= 30.624,96105 \text{ Pa} + 1.865,76 \text{ Pa}\end{aligned}$$

$$= 32.490,72105 \text{ Pa}$$

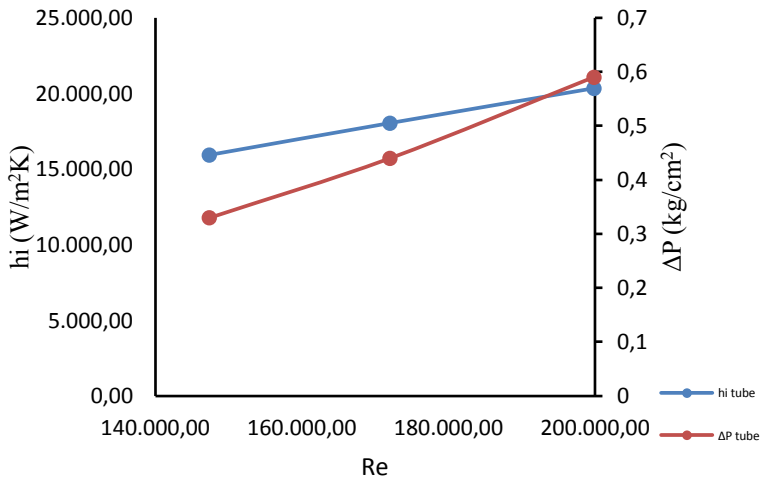
$$= 0,33 \text{ kg/cm}^2$$

Dari berbagai variasi kecepatan, dilakukan langkah-langkah perhitungan yang sama. Sehingga didapatkan hasil seperti pada tabel 4.5 berikut:

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Variasi Kecepatan Tube

| No | v<br>(m/s) | Re         | $h_{i,tube}$<br>(W/m <sup>2</sup> K) | $\Delta P_{tube}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----|------------|------------|--------------------------------------|--|
| 1  | 1,799      | 147.375,92 | 15.930,27                            | 0,33                                       |
| 2  | 2,1        | 172.034,15 | 18.037,26                            | 0,44                                       |
| 3  | 2,44       | 199.887,29 | 20.337,95                            | 0,59                                       |

Dari tabel di atas dapat digambarkan pada grafik pengaruh *Reynolds Number* pada Koefisien Konveksi ( $h_i$ ) dan *Pressure Drop Sisi Internal*, berikut grafik tersebut:



Gambar 4.6 Pengaruh *Reynolds Number* pada Koefisien Konveksi dan *Pressure Drop Sisi Internal*

Dari gambar 4.6 menunjukkan semakin turbulen aliran fluida maka  $h_i$  akan meningkat. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa semakin turbulen aliran fluida maka gesekan yang terjadi antar fluida juga semakin besar. Gesekan ini akan memudahkan proses perpindahan panas yang terjadi sehingga  $h_i$  akan meningkat. Namun gesekan yang semakin besar juga mengakibatkan *pressure drop* yang semakin besar. Hal ini dapat ditinjau melalui nilai Re. Nilai Re akan meningkat jika kecepatan fluida meningkat.

Disisi lain meningkatnya kecepatan menyebabkan gesekan yang terjadi semakin besar yang pada akhirnya menyebabkan *pressure drop* meningkat juga. Hubungan anatara *pressure drop* dengan kecepatan yaitu *pressure drop* merupakan fungsi kuadrat dari kecepatan. Dari grafik diatas dapat dilihat dengan naiknya  $h_i$ , nilai  $\Delta P$  juga naik bahkan sampai melebihi kurva  $h_i$  vs Re. Material *plain carbon steel* memiliki batasan kecepatan maks yang diijinkan agar tidak terjadi vibrasi pada *tube*, yaitu 2,44 m/s sehingga dalam perancangan ini kecepatan yang akan digunakan tidak boleh melebihi batas tersebut. Selain itu  $\Delta P$  yang diijinkan hanya sebesar 0,381 kg/cm<sup>2</sup>.

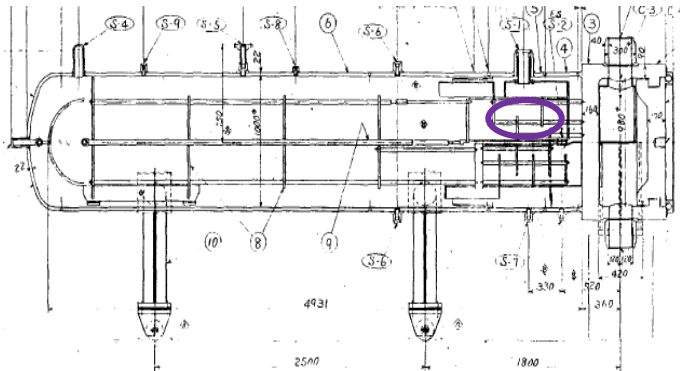
#### 4.2.3 Analisis Perpindahan Panas Eksternal (Sisi *Shell*)

Analisis perpindahan panas eksternal dilakukan berdasarkan analisis aliran eksternal yang melewati *tube bank*. Analisis dilakukan pada masing-masing zona yaitu zona *desuperheating*, zona *condensing*, zona *subcooling*. Analisis perpindahan panas eksternal dilakukan dalam bentuk perhitungan laju perpindahan panas ( $h_o$ ), *overall heat transfer coefficient* (U), luas perpindahan panas (A), jumlah *baffle*, *baffle spacing*, dan *pressure drop* ( $\Delta P$ ) untuk masing-masing zona perpindahan panas pada HPH.

Sebelum menghitung perpindahan panas *external* perlu diketahui terlebih dahulu diameter *inner shell*, luasan perpindahan panas, panjang masing-masing zona, dsb. Berikut ini adalah contoh perhitungan perpindahan panas external HPH 5:

#### 4.2.3.1 Perpindahan Panas pada Zona *Desuperheating*

Zona *desuperheating* adalah zona dimana *steam extraction* turbin (uap panas lanjut) masuk ke dalam HPH mengalami penurunan temperatur atau didinginkan sampai temperatur uap jenuh. Letak zona *desuperheating* pada HPH 5 dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Zona *Desuperheating*  
(Sumber: "Instruction Manual")

Sebelum menghitung dimensi zona *desuperheating*, terlebih dahulu mencari properties fluida dengan melakukan interpolasi pada Tabel A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water.

➤ Temperatur *Mean* ( $T_{\text{mean}}$ )

$$T_{\text{mean}} = \frac{(T_{\text{hi}} + T_{\text{sat}})}{2} = \frac{(655 + 506,9) \text{ K}}{2} = 580,95 \text{ K}$$

$$\rho_{\text{desup}} = 52,54 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{\text{desup}} = 20,49 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$$

$$\text{Pr}_{\text{desup}} = 1,69$$

$$k_{\text{desup}} = 77,36 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$$

➤ Temperatur *Surface* ( $T_s$ )

$$T_s = \frac{(T_{\text{hi}} + T_{\text{x2}})}{2} = \frac{(655 + 487,8) \text{ K}}{2} = 571,4 \text{ K}$$

$$\text{Pr}_{\text{s desup}} = 1,60$$

➤ Koefisien Konveksi Zona *Desuperheating*

- *Baffle spacing* dengan jumlah *baffle* zona *desuperheating* HPH 5 adalah 3 buah.

$$B_s = \frac{L_{desup}}{N_B + 1}$$

$$B_s = \frac{0,851}{3 + 1} = 0,21$$

- Luasan *cross flow desuperheating* ( $A_{s,desup}$ ) karena adanya *baffle*

$$\begin{aligned} A_{s, desup} &= \frac{ID_{shell} B_s}{N_B + 1} \\ &= \frac{1 \text{ m} \times 0,21 \text{ m}}{3 + 1} = 0,0525 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Kecepatan *Stream* ( $V_{s,desup}$ )

$$\begin{aligned} V_{s, desup} &= \frac{\dot{m}_s}{desup A_{s,desup}} \\ V_{s, desup} &= \frac{5,736 \text{ kg/s}}{52,54 \text{ kg/cm}^3 \times 0,0525 \text{ m}^2} \\ &= 2,08 \text{ m/s} \end{aligned}$$

- Kecepatan Maksimum ( $V_{max,desup}$ )

Kecepatan maksimum pada sisi *shell* dapat terjadi pada luas area  $A_1$  atau  $A_2$ . Dicek dengan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} 2(S_D - D) &< (S_T - D) \\ 2(0,02064 - 0,016) \text{ m} &= 0,00928 \\ (0,02064 - 0,016) \text{ m} &= 0,00464 \\ 0,00928 &> 0,00464 \end{aligned}$$

Karena  $2(S_D - D) > (S_T - D)$  maka kecepatan maksimum yang terjadi pada daerah  $A_1$ , sehingga kecepatan maksimum dapat dihitung dengan,

$$V_{max, desup} = \frac{S_T}{S_T - d_{o,tube}} V_{s, desup}$$

$$= \frac{0,02064 \text{ m}}{0,02064 \text{ m} - 0,016 \text{ m}} 2,08 \text{ m/s}$$

$$= 9,25 \text{ m/s}$$

- *Reynolds Number*

$$\text{Re}_{D, \max \text{ desup}} = \frac{\rho_{\text{desup}} V_{\max, \text{desup}} d_{o, \text{tube}}}{\mu_{\text{desup}}}$$

$$= \frac{52,54 \text{ kg/m}^3 \times 9,25 \text{ m/s} \times 0,016 \text{ m}}{20,49 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2} = 379.498,2919$$

- *Nusselt Number*

Sebelum mencari *Nusselt Number*, perlu dicari konstanta C dan m dengan tabel 2.1 Nilai C dan m didapatkan dengan susunan *tube banks staggered* dengan nilai  $ST/SL < 2$  yaitu,

$$\frac{S_T}{S_L} = \frac{0,02064 \text{ m}}{0,01787 \text{ m}}$$

$$= 1,16$$

$$C = 0,35 \left( \frac{S_T}{S_L} \right)^{\frac{1}{5}}$$

$$C = 0,35 (1,16)^{1/5}$$

$$C = 0,36$$

$$m = 0,6$$

$$\text{Nu}_{D_{\text{des}}} = C \text{Re}_{D, \max \text{ des}}^m \text{Pr}^{0,36} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$= 0,36 (379.498,2919)^{0,6} (1,69)^{0,36} \left( \frac{1,69}{1,60} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$= 983,005$$

- *Koefisien Konveksi Zona Desuperheating*

$$h_{o, \text{desup}} = \frac{\text{Nu}_D \times k_{\text{desup}}}{d_{o, \text{tube}}}$$

$$h_{o, \text{desup}} = \frac{983,005 \times 77,36 \times 10^{-3} \text{ W/mK}}{0,016 \text{ m}} = 4.752,83 \text{ W/m}^2\text{K}$$

➤ *Overall Heat Transfer Coefficient Calculation Desuperheating ( $U_{\text{desup}}$ )*

$$U_{\text{desup}} = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2k_{\text{tubewall}}} + \frac{1}{h_{0,\text{desup}}}}$$

$$U_{\text{desup}} = \frac{1}{\frac{0,016 \text{ m}}{0,012 \text{ m}(15.930,27 \text{ W/m}^2\text{K})} + \frac{0,016 \ln\left(\frac{0,016}{0,012}\right)}{2(52,27 \text{ W/mK})} + \frac{1}{4.752,83 \text{ W/m}^2\text{K}}}$$

$$= 2.961,21 \text{ W/m}^2\text{K}$$

➤ *Pressure Drop Zona Desuperheating*

*Pressure drop zona desuperheating* dihitung berdasarkan *pressure drop* pada *tube banks*. Nilai  $f$  dan  $x$  dicari dari gambar 2.18 dengan  $Re_{D,\text{maxdesup}} = 3,7 \times 10^5$ ,  $P_T = (S_T/d_o) = 1,29$ ,  $P_L = (S_L/d_o) = 1,12$ ,  $P_T/P_L = 1,15$ , didapatkan nilai  $f = 0,3$ ;  $x = 1,001$ ; serta  $N_L = 37$ .

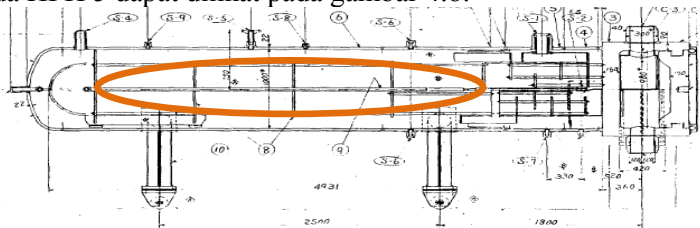
$$\Delta P_{\text{desup}} = N_L x \left( \frac{v_{\text{max}}^2}{2} \right) f$$

$$\Delta P_{\text{desup}} = 37 \cdot 1,001 \left( \frac{52,54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (9,25 \text{ m/s})^2}{2} \right) 0,3$$

$$\Delta P_{\text{desup}} = 24.974,7 \text{ N/m}^2 = 0,26 \text{ kg/cm}^2$$

#### 4.2.3.2 Perpindahan Panas pada Zona Condensing

*Zona condensing* adalah zona dimana *steam extraction* turbin dan *drain* mengalami kondensasi sampai temperatur air jenuh dan melepas panas laten. Pada daerah ini terjadi perubahan fase uap jenuh dan menjadi air jenuh. Letak *zona condensing* pada HPH 5 dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Zona Condensing

(Sumber: "Instruction Manual")

- Koefisien Konveksi Zona *Condensing*

Perhitungan koefisien konveksi zona *condensing* berbeda dengan zona *desuperheating*. Perhitungan koefisien konveksi pada zona *condensing* menggunakan pendekatan lapisan kondensasi pada sistem radial pada *horizontal tube*. Untuk mencari koefisien konveksi pada zona *condensing*, terlebih dahulu mencari properties fluida. Dari Tabel A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water, dengan  $T_{\text{film}} = 495,05 \text{ K}$  didapatkan properties liquid:

$$T_{s, \text{cond}} = \frac{T_{x1} + T_{x2}}{2} = \frac{478,6 \text{ K} + 487,8 \text{ K}}{2} = 483,2 \text{ K}$$

$$T_{\text{film}} = \frac{T_{s, \text{cond}} + T_{\text{sat}}}{2} = \frac{483,2 \text{ K} + 506,9 \text{ K}}{2} = 495,05 \text{ K}$$

$$\rho_l = 837,81 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_l = 120,97 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$$

$$k_l = 646,5 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$C_{p_l} = 4,63 \text{ kJ/kgK}$$

Sedangkan properties *vapor* dengan  $P = 30,6 \text{ kg/cm}^2$ , berdasarkan Table A.3 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Pressure Table didapatkan,

$$\rho_v = 14,99 \text{ kg/m}^3, h_{fg} = 1.795,7 \text{ kJ/kg}$$

Karena  $T_{m, \text{cond}} = T_{\text{sat}}$ , maka dari Tabel A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water, didapatkan  $\mu_v = 16,7 \times 10^{-6} \text{ Pa.s} = 0,04 \frac{\text{lb}}{\text{hr.ft}}$

Koefisien konveksi dapat dihitung sebagai berikut,

*Jacob Number*

$$Ja = \frac{C_{p_l}(T_{\text{sat}} - T_s)}{h_{fg}}$$

$$Ja = \frac{4,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} (506,9 \text{ K} - 483,2 \text{ K})}{1.795,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,061$$

Kalor Laten

$$h_{fg} = h_{fg}(1 + 0,68Ja)$$



$$h_{fg} = 1.795,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (1 + 0,68 \cdot 0,061) = 1.870,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

*Nusselt number*

$$\text{Nu}_D = C \left( \frac{g \times \rho_l \times (\rho_l - \rho_v) \times d_o^3 \times h'_{fg}}{k_l \times \mu_l (T_{\text{sat}} - T_s)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{Nu}_D = 0,729 \left( \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 837,81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (837,81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 14,99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \times (0,016 \text{ m})^3 \times 1.870,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{646,5 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}} \times 120,97 \times 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \times (506,9 \text{ K} - 483,2 \text{ K})} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{Nu}_D = 53,005$$

Koefisien konveksi sisi *shell* zona *condensing*

Pada zona *condensing* terjadi perubahan fase dalam proses perpindahan panasnya sehingga digunakan persamaan berikut.

$$h_{o,\text{con}} = \left( \frac{\text{Nu}_D \times k_l}{d_o} \right)$$

$$h_{o,\text{con}} = \left( \frac{53,005 \times 646,5 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0,016 \text{ m}} \right)$$

$$h_{o,\text{con}} = 2.141,73 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Diketahui jumlah jajaran *tube* sebanyak 37 buah yang diperoleh dari gambar desain HPH 5 maka :

$$h_{o,N} = h_{o,\text{con}} \cdot N_L^n$$

$$h_{o,N} = \left( 2.141,73 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right) \times 37^{-\frac{1}{6}}$$

$$h_{o,N} = 1.201,86 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

• *Overall Heat Transfer Coefficient*

$$U_{\text{cond}} = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o \ln \left( \frac{d_o}{d_i} \right)}{2k_{\text{tubewall}}} + \frac{1}{h_{o \text{ cond}}}}$$

$$U_{\text{cond}} = \frac{1}{\frac{0,016 \text{ m}}{0,012 \text{ m}(15.930,27 \text{ W/m}^2\text{K})} + \frac{0,016 \ln\left(\frac{0,016}{0,012}\right)}{2(52,27 \text{ W/mK})} + \frac{1}{1.201,86 \text{ W/m}^2\text{K}}}$$

$$U_{\text{cond}} = 1.041,99 \text{ W/m}^2\text{K}$$

• *Pressure drop zona condensing*

Rumus yang digunakan dalam mencari *pressure drop* pada daerah *condensing* berbeda dengan zona *desuperheating*, dikarenakan pada zona *condensing* fasa fluida adalah *mixture*. *Pressure drop* pada zona *condensing* digunakan pendekatan *pressure drop* untuk aliran dua fasa melewati *tube bundle*.

Jumlah *baffle* ( $N_B$ )

Jumlah *baffle* yang digunakan pada zona *condensing* 4 buah karena *baffle* pada zona *condensing* lebih berfungsi sebagai penyangga *tube*.

*Baffle spacing* ( $B_s$ )

$$N_B = \frac{L_{\text{cond}}}{B_s} - 1$$

$$N_B + 1 = \frac{L_{\text{cond}}}{B_s}$$

$$B_s = \frac{L_{\text{cond}}}{N_B + 1} = \frac{7,864 \text{ m}}{4 + 1}$$

$$= 1,5728 \text{ m}$$

$$= 61,92 \text{ in}$$

Luas minimum untuk *cross flow* ( $A_s$ )

$$A_s = \frac{B_s ID_{\text{shell}} (S_T - d_o)}{S_T}$$

$$A_s = \frac{61,92 \text{ in} \times 39,37 \text{ in} (0,81 \text{ in} - 0,63 \text{ in})}{0,81 \text{ in}}$$

$$A_s = 541,73 \text{ in}^2$$

*Mass Velocity* ( $G_s$ )

$$G_s = \frac{\dot{m}_{\text{steam}}}{A_s}$$

$$G_s = \frac{45.524,575 \frac{\text{lb}}{\text{h}}}{541,73 \text{ in}^2}$$

$$G_s = 84,04 \frac{\text{lb}}{\text{hr. in}^2}$$

$$G_s = 12.109,51 \frac{\text{lb}}{\text{hr. ft}^2}$$

Diameter Ekuivalen

$$D_e = 4 \left[ \frac{S_T \sqrt[2]{3}}{4} - \frac{d_o}{8} \right]$$

$$D_e = 4 \left[ \frac{0,02064 \sqrt[2]{3}}{4} - \frac{.0,016 \text{ m}}{8} \right]$$

$$D_e = 0,06084 \text{ m}$$

$$D_e = 0,19 \text{ ft}$$

Reynold number ( $Re_s$ )

$$Re_s = \frac{G_s \times D_e}{\mu_{\text{vapor}}}$$

$$Re_s = \frac{12.109,51 \frac{\text{lb}}{\text{hr. ft}^2} \times 0,19 \text{ ft}}{0,04 \frac{\text{lb}}{\text{hr. ft}}}$$

$$Re_s = 57.520,1725$$

Friction factor ( $f$ )

$$f = \exp (0,576 - 0,19 \ln (Re_s))$$

$$f = \exp (0,576 - 0,19 \ln (57.520,1725))$$

$$f = 0,22$$

Jumlah Crosses

$$(N + 1) = \frac{12L_{\text{cond}}}{B_s}$$

$$(N + 1) = \frac{12 \times 309,6 \text{ in}}{61,92 \text{ in}}$$

$$(N + 1) = 60$$

Gravitasi Spesifik

$$s = 1 \times 62,5$$

Pressure Drop

$$\Delta P_{\text{cond}} = \frac{1}{2} \frac{f G_s^2 D_s (N + 1)}{5,22 \times 10^{10} D_e s}$$

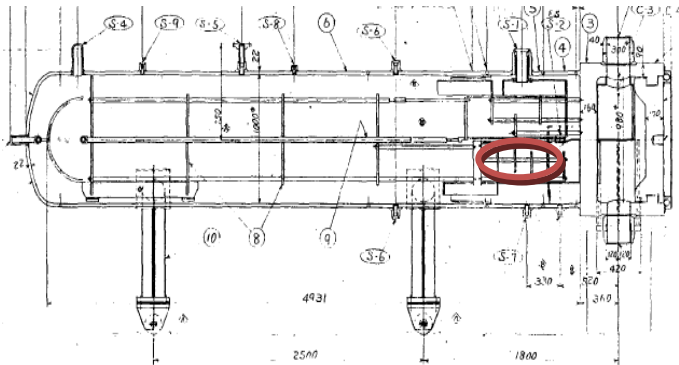
$$\Delta P_{\text{cond}} = \frac{1}{2} \frac{0,22 \times \left( 12.109,51 \frac{\text{lb}}{\text{hr. ft}^2} \right)^2 \times 39,37 (60)}{5,22 \times 10^{10} \times 0,19 \text{ ft} \times 62,5}$$

$$\Delta P_{\text{cond}} = 0,062 \text{ psi}$$

$$\Delta P_{\text{cond}} = 0,0044 \text{ kgf/cm}^2$$

#### 4.2.3.3 Perpindahan Panas pada Zona Subcooling

Zona *subcooling* merupakan zona lanjutan dari *condensing* dimana uap yang telah menjadi fasa cair jenuh terus memanaskan *feedwater* hingga mencapai temperatur *subcool*. Letak zona *subcooling* ditunjukkan pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Zona Subcooling

(Sumber: "Instruction Manual")

Perhitungan pada zona subcooling sama dengan zona *desuperheating*. Setelah dilakukan perhitungan yang sama dengan zona *desuperheating*, maka didapatkan panjang zona *subcooling* 0,899 m, luasan perpindahan panas 24,0 m<sup>2</sup>, koefisien konveksi

16.229,13 W/m<sup>2</sup>K. Nilai *pressure drop* sebesar 0,07 kg/cm<sup>2</sup> dengan jumlah *baffle* sebanyak 5 buah dan jarak antar *baffle* sebesar 0,149 m.

#### 4.2.3.4 Total Pressure Drop Sisi Shell

$$\Delta P_{\text{shell}} = \Delta P_{\text{desup}} + \Delta P_{\text{cond}} + \Delta P_{\text{sub}}$$

$$\Delta P_{\text{shell}} = 0,26 \text{ kg/cm}^2 + 0,0044 \text{ kg/cm}^2 + 0,07 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta P_{\text{shell}} = 0,3344 \text{ kg/cm}^2$$

### 4.3 Desain Optimal HPH 5

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh desain optimal dari HPH 5 sebagai berikut:

Tabel 4.6 Desain Optimal HPH 5

| <i>TUBE</i>           |                           |                      |                     |
|-----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|
| Diameter luar         | 0,016 m                   |                      |                     |
| Diameter dalam        | 0,012 m                   |                      |                     |
| Panjang <i>tube</i>   | 9,614 m                   |                      |                     |
| Jumlah <i>tube</i>    | 531                       |                      |                     |
| Kecepatan <i>tube</i> | 1,799 m/s                 |                      |                     |
| <i>Pressure drop</i>  | 0,33 kg/cm <sup>2</sup>   |                      |                     |
| <i>SHELL</i>          | Zona<br>Desuperheating    | Zona<br>Condensing   | Zona<br>Subcooling  |
| Panjang zona          | 0,851 m                   | 7,864 m              | 0,899 m             |
| Luasan zona           | 22,7 m <sup>2</sup>       | 209,9 m <sup>2</sup> | 24,0 m <sup>2</sup> |
| Jumlah <i>baffle</i>  | 3                         | 4                    | 5                   |
| <i>Baffle spacing</i> | 0,21 m                    | 1,578 m              | 0,149 m             |
| <i>ID shell</i>       | 1 m                       |                      |                     |
| Luasan total          | 256,6 m <sup>2</sup>      |                      |                     |
| <i>Pressure drop</i>  | 0,3344 kg/cm <sup>2</sup> |                      |                     |

### 4.4 Analisis Performance

Analisis performance pada *heat exchanger* dilakukan dengan metode *Number of Transfer Unit* (NTU). Salah satu nilai untuk

menentukan unjuk kerja *heat exchanger* dengan menggunakan *effectiveness* ( $\epsilon$ ).  $\epsilon$  adalah perbandingan laju perpindahan panas aktual terhadap kemampuan laju perpindahan panas maksimum *heat exchanger*. Harga  $\epsilon$  berkisar antara 0 sampai dengan 1. Semakin besar harga *effectiveness* suatu *heat exchanger* semakin baik dalam mentransfer panas, karena harga laju perpindahan panas aktualnya mendekati jumlah energi panas maksimum yang dapat ditransfer. Uji *performance* HPH 5 dilakukan dengan memvariasikan *plugging* sebesar 0-10%. Analisis perhitungan untuk mencari *performance heat exchanger* sebagai berikut:

- Laju Perpindahan Panas Total

$$q_{\text{tot}} = 13.146,66 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

- Mencari  $\Delta T_{\text{LMTD Total}}$

$$\Delta T_{\text{LMTD Total}} = \frac{(T_{\text{hi}} - T_{\text{co}}) - (T_{\text{ho}} - T_{\text{ci}})}{\ln \left( \frac{T_{\text{hi}} - T_{\text{co}}}{T_{\text{ho}} - T_{\text{ci}}} \right)}$$

$$\Delta T_{\text{LMTD Total}} = \frac{(655 - 504,1) \text{ K} - (482,9 - 477,3) \text{ K}}{\ln \left( \frac{655 - 504,1}{482,9 - 477,3} \right) \text{ K}} = 45,41 \text{ K}$$

- Mencari *Overall Heat Transfer Coefficient* Total  
Perhitungan untuk mencari  $U$  total dilakukan dengan mengansumsikan *plugging* = 0 % terlebih dahulu, sehingga diperoleh:

$$U_{\text{tot}} = \frac{q_{\text{tot}}}{A_{\text{tot}} \Delta T_{\text{LMTD Total}}}$$

$$U_{\text{tot}} = \frac{13.146,66 \text{ kW}}{256,6 \text{ m}^2 \times 45,41 \text{ K}}$$

$$U_{\text{tot}} = 1,1283 \text{ kW/m}^2\text{K} = 1.128,3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Mencari Koefisien Konveksi pada Sisi *Shell*

$$U_{\text{tot}} = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o \ln (d_o/d_i)}{2k_{\text{tubewall}}} + \frac{1}{h_o}}$$

$$1.128,3 \frac{W}{m^2 K} = \frac{1}{\frac{0,016 \text{ m}}{0,012 \times 15.930,27 \frac{W}{m^2 K}} + \frac{0,016 \ln\left(\frac{0,016}{0,012}\right)}{2 \times 52,57 \frac{W}{m^2 K}} + \frac{1}{h_o}}$$

$$h_o = 1.273,62 \frac{W}{m^2 K}$$

- Mencari Kapasitas Panas Fluida Dingin

$$C_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c}$$

$$C_c = 108,05 \frac{kg}{s} \cdot 4,54 \frac{kJ}{kg.K}$$

$$C_c = 490,55 \frac{kJ}{s.K}$$

- Mencari Kapasitas Panas Fluida Panas

$$C_{p_h} = \frac{\dot{m}_c C_{p_c} \Delta T_c}{\dot{m}_h \Delta T_h}$$

$$C_{p_h} = \frac{108,05 \frac{kg}{s} \cdot 4,54 \frac{kJ}{kg.K} \cdot (504,1 - 477,3) K}{5,736 \frac{kg}{s} \cdot (655 -)} = 13,32 \frac{kJ}{kg.K}$$

$$C_h = \dot{m}_h \cdot C_{p_h}$$

$$C_h = 5,736 \frac{kg}{s} \cdot 13,32 \frac{kJ}{kg.K}$$

$$C_h = 76,40 \frac{kJ}{s.K}$$

- Mencari Cr (Rasio Kapasitas Panas)

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

$$C_r = \frac{76,40 \frac{kJ}{s.K}}{490,55 \frac{kJ}{s.K}}$$

$$C_r = 0,16$$

- Mencari NTU

$$NTU = \frac{U_{tot} A_{tot}}{C_{min}}$$

$$NTU = \frac{1.128,3 \frac{W}{m^2 K} \times 256,6 \text{ m}^2}{76.400 \frac{J}{s.K}} = 3,79$$

- Mencari *Effectiveness*

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + Cr + (1 + Cr^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp \left[ -(NTU)(1 + Cr^2)^{1/2} \right]}{1 - \exp \left[ -(NTU)(1 + Cr^2)^{1/2} \right]} \right\}^{-1}$$

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + 0,16 + (1 + 0,16^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp \left[ -(3,79)(1 + 0,16^2)^{1/2} \right]}{1 - \exp \left[ -(3,79)(1 + 0,16^2)^{1/2} \right]} \right\}^{-1}$$

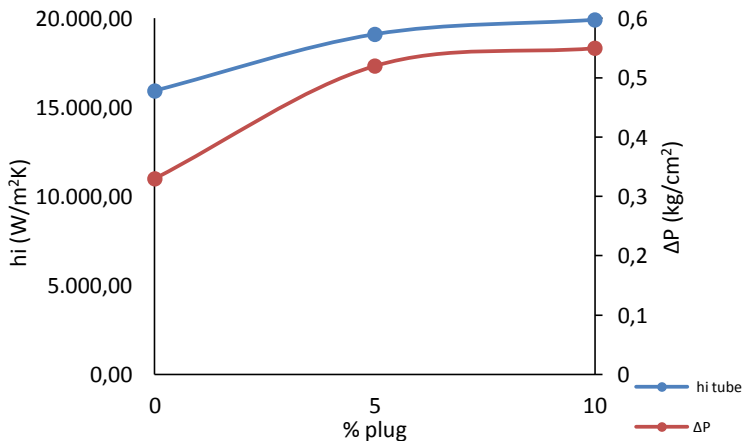
$$\varepsilon = 0,88$$

Hasil perhitungan performance HPH 5 dengan cara yang sama dengan variasi *plugging* 0-10% ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan NTU- $\varepsilon$  Variasi 0-10% *Plugging*

| % plug | $N_t$ | $v_{tube}$ (m/s) | $h_{i,tube}$ (W/m <sup>2</sup> K) | NTU  | $\varepsilon$ | $\Delta P$ (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|--------|-------|------------------|-----------------------------------|------|---------------|----------------------------------|
| 0      | 531   | 1,799            | 15.930,27                         | 3,79 | 0,88          | 0,33                             |
| 5      | 505   | 2,25             | 19.110,04                         | 3,74 | 0,85          | 0,52                             |
| 10     | 478   | 2,37             | 19.923,00                         | 3,72 | 0,83          | 0,58                             |

Tabel di atas dapat digambarkan pada grafik sebagai berikut,

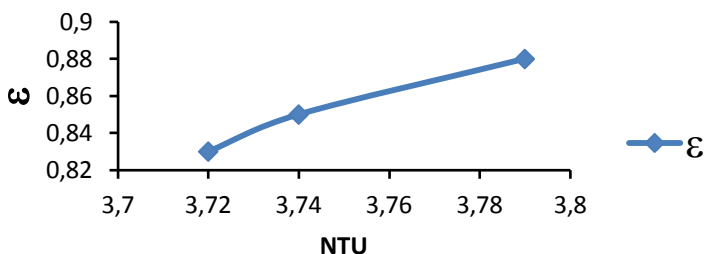


Gambar 4.10 Pengaruh Koefisien Konveksi dan *Pressure Drop* terhadap *Plugging*



Dari gambar 4.10 di atas dapat dilihat bahwa semakin banyak *plugging*, maka nilai koefisien konveksi dan *pressure drop* sisi *tube* juga akan semakin meningkat. Semakin banyak *plugging tube* mengakibatkan luasan *tube* menjadi semakin kecil, hal ini berpengaruh pada kecepatan *tube* yang semakin meningkat. Meningkatnya kecepatan *tube* juga akan menyebabkan meningkatnya *Reynolds Number* sehingga koefisien konveksinya akan semakin naik. Akan tetapi naiknya kecepatan *tube* juga akan berakibat pada naiknya harga *pressure drop* pada *tube*. Kecepatan *tube* yang tinggi dapat menyebabkan vibrasi, oleh karena itu *plugging tube* dibatasi sampai 10% dari total jumlah *tube* karena pada perhitungan 10% *plugging* kecepatan *tube*-nya 2,37 m/s mendekati kecepatan maksimum yang diizinkan yaitu 2,44 m/s.

Berikut grafik untuk pengaruh NTU dan  $\epsilon$  akibat *plugging*,



Gambar 4.11 Pengaruh NTU dan  $\epsilon$  Akibat *Plugging*

Dari gambar 4.11 menunjukkan bahwa semakin kecil nilai NTU maka nilai *effectivness* juga akan semakin kecil dengan nilai  $Cr$  yang konstan. Grafik NTU- $\epsilon$  didapat dengan memvariasikan *plugging tube* sebesar 0-10%. Nilai NTU dipengaruhi oleh variasi *plugging tube*. Semakin banyak *tube* yang di-*plugging*, nilai NTU- $\epsilon$  akan semakin menurun akibat luasan perpindahan panas sisi *tube* semakin berkurang. Menurunnya nilai NTU berakibat pada menurunnya *effectivness heat exchanger*. Jadi semakin banyak *plugging tube*, maka *effectivness heat exchanger* akan semakin menurun.

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perancangan HPH 5 dengan menggunakan analisis termodinamika dan perpindahan panas yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Dimensi utama HPH 5 didapatkan panjang *tube* sebesar 9,614 m, jumlah *tube* 531 buah dan diameter dalam *shell* sebesar 1 m. *Pressure drop* sisi *tube* sebesar  $0,33 \text{ kg/cm}^2$ . *Pressure drop* sisi *shell* sebesar  $0,3344 \text{ kg/cm}^2$ .
2. Pada zona *desuperheating* didapatkan panjang zona sebesar 0,851 m dengan *baffle spacing* sebesar 0,21 m dengan jumlah *baffle* sebanyak 3 buah. *Pressure drop* pada zona *desuperheating* sebesar  $0,26 \text{ kg/cm}^2$ .
3. Pada zona *condensing* didapatkan panjang zona sebesar 7,864 m dengan *baffle spacing* sebesar 1,5728 m dengan jumlah *baffle* sebanyak 4 buah. *Pressure drop* pada zona *condensing* sebesar  $0,0044 \text{ kg/cm}^2$ .
4. Pada zona *subcooling* didapatkan panjang zona sebesar 0,899 m dengan *baffle spacing* sebesar 0,149 m dengan jumlah *baffle* sebanyak 5 buah. *Pressure drop* pada zona *subcooling* sebesar  $0,07 \text{ kg/cm}^2$ .
5. Semakin tinggi kecepatan *feedwater* (kecepatan *tube*) maka koefisien konveksi sisi *tube* dan *pressure drop tube* akan semakin meningkat, dengan laju alir massa *feedwater* konstan.
6. Maksimum *plugging* yang diijinkan adalah sebesar 10% dari total jumlah *tube*. Jika melebihi batas, akan terjadi vibrasi.
7. Semakin banyak *tube* yang di-*plug*, *effectivness*-nya akan semakin menurun sedangkan *pressure drop* dan kecepatan sisi *tube*-nya akan meningkat.

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat disampaikan setelah melakukan perancangan HPH 5 adalah sebagai berikut,

1. Perhitungan perancangan HPH 5 ini sebaiknya digunakan *software* khusus perancangan *feedwater heater* sebagai pembanding agar didapatkan hasil yang lebih akurat.
2. Referensi (baik *manual book* maupun jurnal) yang khusus membahas desain *feedwater heater* jumlahnya sangat kurang. Oleh karena itu perlu adanya penelitian lebih lanjut tentang *feedwater heater*.

## DAFTAR PUSTAKA

1. **Incropera, F.P., and De Witt, D.P.** 2011. *“Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition”*. Singapore: John Willey & Sons, Inc.
2. **Kakac, Sadik, and Hongtan Liu.** 2002. *“Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design Second Edition”*. Florida: Department of Mechanical Engineering University of Miami.
3. **Moran, Michael J. and Shapiro, Howard.** 2006. *“Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5th Edition”*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
4. **Siman, Aziz and Shelton, Joe.** *“Feedwater Heater Application of T-22 Tubing. 1-7”*.
5. **Kuppan, T.** 2000. *“Heat Exchanger Design Handbook”*. New York : Marcel Dekker, Inc.
6. **Fox, Robert W., McDonald, Alan T. and Pritchard, Philip J.** 2011. *“Introduction to Fluid Mechanics Eighth Edition”*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
7. **As-Build Drawing for Gresik Steam Power Plant Units I and II 2x100 MW.** 1981. *“Calculation Sheet Determination for Feedwater Heaters TZ-1003”*. Tokyo, Japan: Sumitomo Corporation.
8. **Barkah, Dhany Ahmad.** 2011. *“Redesign dan Recalculation High Pressure Heater (HPH) 7 PT. PJB UP. Paiton pada Zona Subcooled Menggunakan Analisa Termodinamika dan Perpindahan Panas”*. Surabaya: Teknik Mesin ITS.

9. **Heat Exchanger Institute, Inc.** 2004. *“Standards for Closed Feedwater Heater”*. Seventh Edition. Ohio, United States of America. McGraw-Hill. New Delhi, India.
10. **Divedi, Harikesh.** 2016. *“Difference Between Open Feedwater Heater and Closed Feedwater Heater”*. <http://www.hkdivedi.com/2016/11/difference-between-open-feedwater.html> (diakses tanggal 3 Mei 2017)
11. **Jhon, Iqiq F.O.** 2011. *“Re-design High Pressure Heater (HPH) 6 PT. PJB UP Paiton Pada Zona Desuperheating Menggunakan Analisa Termodinamika dan Perpindahan Panas”*. Surabaya: Teknik Mesin ITS.
12. **Budhiyanto, Akbar.** 2015. *“Re-design High Pressure Heater (HPH) PT. PJB UP Gresik Menggunakan Analisa Termodinamika dan Perpindahan Panas”*. Surabaya: D3 Teknik Mesin Kerjasama PT. PLN (Persero) ITS.
13. **Febriati, Warida.** 2015. *“Re-design High Pressure Heater (HPH) 6 di PLTU UNIT 3 PT. Pembangkitan Jawa Bali Unit Pembangkitan Gresik dengan Analisis Termodinamika dan Perpindahan Panas”*. Surabaya: Teknik Mesin ITS.
14. **Sumimoto Corporation.** *“Instruction Manual-DIV. II for Steam Turbine and Auxilary Equipment”*. Tokyo, Japan.
15. **Sari, Tara Puspita.** 2015. *“Analisis Perhitungan Performa High Pressure Feedwater Heater (HPH) 7 Unit 3 PLTU PT. PJB UP Gresik Sebelum dan Sesudah Retubing”*. Surabaya: D3 Teknik Mesin Kerjasama PT. PLN (Persero) ITS.
16. **Dewi, Sherly Nazulia.** 2015. *“Analisis Perhitungan Perpindahan Panas pada Low Pressure Feedwater Heater (LPH) 4 Unit 3 PLTU Di PT. PJB UP Gresik”*. Surabaya: D3 Teknik Mesin Kerjasama PT. PLN (Persero) ITS.

17. **Mrzljak, Vedran., Poljak, Igor., and Vedran, Medica-Viola.** *“Thermodynamical Analysis of High-Pressure Feed Water Heater In Steam Propulsion System During Exploitation”*. Volume 68 Number 2, 2017.
18. **Suradika, Darmaji.** 2011. *“Re-Design dan Re-Calculation High Pressure Heater (HPH) 7 PT. PJB UP. Paiton pada Zona Desuperheating Menggunakan Analisa termodinamika dan Perpindahan Panas”*. Surabaya: Teknik Mesin ITS.

## LAMPIRAN

### LAMPIRAN I: Tabel A.3 Properties of Saturated Water (Liquid – Vapor): Pressure Table

**TABLE A-3** Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Pressure Table

| Press.<br>bar | Temp.<br>°C | Specific Volume<br>m <sup>3</sup> /kg |                        | Internal Energy<br>kJ/kg |                        | Enthalpy<br>kJ/kg       |                   |                        | Entropy<br>kJ/kg · K    |                        | Press.<br>bar |
|---------------|-------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|
|               |             | Sat.<br>Liquid<br>$v_f \times 10^3$   | Sat.<br>Vapor<br>$v_g$ | Sat.<br>Liquid<br>$u_f$  | Sat.<br>Vapor<br>$u_g$ | Sat.<br>Liquid<br>$h_f$ | Evap.<br>$h_{fg}$ | Sat.<br>Vapor<br>$h_g$ | Sat.<br>Liquid<br>$s_f$ | Sat.<br>Vapor<br>$s_g$ |               |
| 0.04          | 28.96       | 1.0040                                | 34.800                 | 121.45                   | 2415.2                 | 121.46                  | 2432.9            | 2554.4                 | 0.4226                  | 8.4746                 | 0.04          |
| 0.06          | 36.16       | 1.0064                                | 23.739                 | 151.53                   | 2425.0                 | 151.53                  | 2415.9            | 2567.4                 | 0.5210                  | 8.3304                 | 0.06          |
| 0.08          | 41.51       | 1.0084                                | 18.103                 | 173.87                   | 2432.2                 | 173.88                  | 2403.1            | 2577.0                 | 0.5926                  | 8.2287                 | 0.08          |
| 0.10          | 45.81       | 1.0102                                | 14.674                 | 191.82                   | 2437.9                 | 191.83                  | 2392.8            | 2584.7                 | 0.6493                  | 8.1502                 | 0.10          |
| 0.20          | 60.06       | 1.0172                                | 7.649                  | 251.38                   | 2456.7                 | 251.40                  | 2358.3            | 2609.7                 | 0.8320                  | 7.9085                 | 0.20          |
| 0.30          | 69.10       | 1.0223                                | 5.229                  | 289.20                   | 2468.4                 | 289.23                  | 2336.1            | 2625.3                 | 0.9439                  | 7.7686                 | 0.30          |
| 0.40          | 75.87       | 1.0265                                | 3.993                  | 317.53                   | 2477.0                 | 317.58                  | 2319.2            | 2636.8                 | 1.0259                  | 7.6700                 | 0.40          |
| 0.50          | 81.33       | 1.0300                                | 3.240                  | 340.44                   | 2483.9                 | 340.49                  | 2305.4            | 2645.9                 | 1.0910                  | 7.5939                 | 0.50          |
| 0.60          | 85.94       | 1.0331                                | 2.732                  | 359.79                   | 2489.6                 | 359.86                  | 2293.6            | 2653.5                 | 1.1453                  | 7.5320                 | 0.60          |
| 0.70          | 89.95       | 1.0360                                | 2.365                  | 376.63                   | 2494.5                 | 376.70                  | 2283.3            | 2660.0                 | 1.1919                  | 7.4797                 | 0.70          |
| 0.80          | 93.50       | 1.0380                                | 2.087                  | 391.58                   | 2498.8                 | 391.66                  | 2274.1            | 2665.8                 | 1.2329                  | 7.4346                 | 0.80          |
| 0.90          | 96.71       | 1.0410                                | 1.869                  | 405.06                   | 2502.6                 | 405.15                  | 2265.7            | 2670.9                 | 1.2695                  | 7.3949                 | 0.90          |
| 1.00          | 99.63       | 1.0432                                | 1.694                  | 417.36                   | 2506.1                 | 417.46                  | 2258.0            | 2675.5                 | 1.3026                  | 7.3594                 | 1.00          |
| 1.50          | 111.4       | 1.0528                                | 1.159                  | 466.94                   | 2519.7                 | 467.11                  | 2226.5            | 2693.6                 | 1.4336                  | 7.2233                 | 1.50          |
| 2.00          | 120.2       | 1.0605                                | 0.8857                 | 504.49                   | 2529.5                 | 504.70                  | 2201.9            | 2706.7                 | 1.5301                  | 7.1271                 | 2.00          |
| 2.50          | 127.4       | 1.0672                                | 0.7187                 | 535.10                   | 2537.2                 | 535.37                  | 2181.5            | 2716.9                 | 1.6072                  | 7.0527                 | 2.50          |
| 3.00          | 133.6       | 1.0732                                | 0.6058                 | 561.15                   | 2543.6                 | 561.47                  | 2163.8            | 2725.3                 | 1.6718                  | 6.9919                 | 3.00          |
| 3.50          | 138.9       | 1.0786                                | 0.5243                 | 583.95                   | 2546.9                 | 584.33                  | 2148.1            | 2732.4                 | 1.7275                  | 6.9405                 | 3.50          |
| 4.00          | 143.6       | 1.0836                                | 0.4625                 | 604.31                   | 2553.6                 | 604.74                  | 2133.8            | 2738.6                 | 1.7766                  | 6.8959                 | 4.00          |
| 4.50          | 147.9       | 1.0882                                | 0.4140                 | 622.25                   | 2557.6                 | 623.25                  | 2120.7            | 2743.9                 | 1.8207                  | 6.8565                 | 4.50          |
| 5.00          | 151.9       | 1.0926                                | 0.3749                 | 639.68                   | 2561.2                 | 640.23                  | 2108.5            | 2748.7                 | 1.8607                  | 6.8212                 | 5.00          |
| 6.00          | 158.9       | 1.1006                                | 0.3157                 | 669.90                   | 2567.4                 | 670.56                  | 2086.3            | 2756.8                 | 1.9312                  | 6.7600                 | 6.00          |
| 7.00          | 165.0       | 1.1080                                | 0.2729                 | 696.44                   | 2572.5                 | 697.22                  | 2066.3            | 2763.5                 | 1.9922                  | 6.7080                 | 7.00          |
| 8.00          | 170.4       | 1.1148                                | 0.2404                 | 720.22                   | 2576.8                 | 721.11                  | 2048.0            | 2769.1                 | 2.0462                  | 6.6628                 | 8.00          |
| 9.00          | 175.4       | 1.1212                                | 0.2150                 | 741.83                   | 2580.5                 | 742.83                  | 2031.1            | 2773.9                 | 2.0946                  | 6.6226                 | 9.00          |
| 10.0          | 179.9       | 1.1273                                | 0.1944                 | 761.68                   | 2583.6                 | 762.81                  | 2015.3            | 2778.1                 | 2.1387                  | 6.5863                 | 10.0          |
| 15.0          | 198.3       | 1.1539                                | 0.1318                 | 843.16                   | 2594.5                 | 844.84                  | 1947.3            | 2792.2                 | 2.3150                  | 6.4448                 | 15.0          |
| 20.0          | 212.4       | 1.1767                                | 0.09963                | 906.44                   | 2600.3                 | 908.79                  | 1890.7            | 2799.5                 | 2.4474                  | 6.3409                 | 20.0          |
| 25.0          | 224.0       | 1.1973                                | 0.07998                | 959.11                   | 2603.1                 | 962.11                  | 1841.0            | 2803.1                 | 2.5547                  | 6.2575                 | 25.0          |
| 30.0          | 233.9       | 1.2165                                | 0.06668                | 1004.8                   | 2604.1                 | 1008.4                  | 1795.7            | 2804.2                 | 2.6457                  | 6.1869                 | 30.0          |
| 35.0          | 242.6       | 1.2347                                | 0.05707                | 1045.4                   | 2603.7                 | 1049.8                  | 1753.7            | 2803.4                 | 2.7253                  | 6.1253                 | 35.0          |
| 40.0          | 250.4       | 1.2522                                | 0.04978                | 1082.3                   | 2602.3                 | 1087.3                  | 1714.1            | 2801.4                 | 2.7964                  | 6.0701                 | 40.0          |
| 45.0          | 257.5       | 1.2692                                | 0.04406                | 1116.2                   | 2600.1                 | 1121.9                  | 1676.4            | 2798.3                 | 2.8610                  | 6.0199                 | 45.0          |
| 50.0          | 264.0       | 1.2859                                | 0.03944                | 1147.8                   | 2597.1                 | 1154.2                  | 1640.1            | 2794.3                 | 2.9202                  | 5.9734                 | 50.0          |
| 60.0          | 275.6       | 1.3187                                | 0.03244                | 1205.4                   | 2589.7                 | 1213.4                  | 1571.0            | 2784.3                 | 3.0267                  | 5.8892                 | 60.0          |
| 70.0          | 285.9       | 1.3513                                | 0.02737                | 1257.6                   | 2580.5                 | 1267.0                  | 1505.1            | 2772.1                 | 3.1211                  | 5.8133                 | 70.0          |
| 80.0          | 295.1       | 1.3842                                | 0.02352                | 1305.6                   | 2569.8                 | 1316.6                  | 1441.3            | 2758.0                 | 3.2068                  | 5.7432                 | 80.0          |
| 90.0          | 303.4       | 1.4178                                | 0.02048                | 1350.5                   | 2557.8                 | 1363.3                  | 1378.9            | 2742.1                 | 3.2858                  | 5.6772                 | 90.0          |
| 100.          | 311.1       | 1.4524                                | 0.01803                | 1393.0                   | 2544.4                 | 1407.6                  | 1317.1            | 2724.7                 | 3.3596                  | 5.6141                 | 100.          |
| 110.          | 318.2       | 1.4886                                | 0.01599                | 1433.7                   | 2529.8                 | 1450.1                  | 1255.5            | 2705.6                 | 3.4295                  | 5.5527                 | 110.          |

Sumber: Michael J. Moran and Howard Saphiro, 2006

LAMPIRAN II: Tabel Kecepatan *Feedwater* Maksimum yang Dijijinkan Berdasarkan Jenis Material *Tube*

| Tube Material                  | T22    | SS304N | SS304  | Monel |
|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| Tube Design P (Psig)           | 3700   | 3700   | 3700   | 3700  |
| Shell Design P (Psig)          | 900    | 900    | 900    | 900   |
| Tube side velocity @ Avg.T fps | 8      | 8.5    | 8.5    | 8     |
| Tube size (in)                 | 0.75   | 0.625  | 0.625  | .625  |
| Tube side Pressure Drop (Psi)  | 9.1    | 11     | 11.7   | 9     |
| Tubewall Thick. Avg. (in)      | .088"  | .077"  | .083"  | .053" |
| Gross Surface Area (Sq.Ft.)    | 10945  | 12489  | 12955  | 9759  |
| Overall Length (Ft)            | 36.75' | 36.5'  | 36.25' | 33'   |
| Shell ID (in)                  | 52"    | 53"    | 54"    | 51"   |
| Weight (lbs)                   | 91000  | 92000  | 99000  | 73000 |
| Relative cost                  | 100    | 122    | 129    | 247   |

Sumber: Aziz Shiman and Joe Shelton, Unknown



# LAMPIRAN III: Tabel 8.1 Dimensional Data for Commercial Tubing

**TABLE 8.1**

Dimensional Data for Commercial Tubing

| OD of<br>Tubing<br>(in.) | BWG<br>Gauge | Thickness<br>(in.) | Internal<br>Flow<br>Area<br>(in. <sup>2</sup> ) | Sq. Ft.<br>External<br>Surface<br>per Ft.<br>Length | Sq. Ft.<br>Internal<br>Surface<br>per Ft.<br>Length | Weight<br>per Ft.<br>Length,<br>Steel<br>(lb.) | ID<br>Tubing<br>(in.) | OD/ID |
|--------------------------|--------------|--------------------|---|---|---|--|-----------------------|-------|
| 1/4                      | 22           | 0.028              | 0.0295  | 0.0655  | 0.0508  | 0.066  | 0.194                 | 1.289 |
| 1/4                      | 24           | 0.022              | 0.0333  | 0.0655  | 0.0539  | 0.054  | 0.206                 | 1.214 |
| 1/4                      | 26           | 0.018              | 0.0360  | 0.0655  | 0.0560  | 0.045  | 0.214                 | 1.168 |
| 3/8                      | 18           | 0.049              | 0.0603  | 0.0982  | 0.0725  | 0.171  | 0.277                 | 1.354 |
| 3/8                      | 20           | 0.035              | 0.0731  | 0.0982  | 0.0798  | 0.127  | 0.305                 | 1.233 |
| 3/8                      | 22           | 0.028              | 0.0799  | 0.0982  | 0.0835  | 0.104  | 0.319                 | 1.176 |
| 3/8                      | 24           | 0.022              | 0.0860  | 0.0982  | 0.0867  | 0.083  | 0.331                 | 1.133 |
| 1/2                      | 16           | 0.065              | 0.1075  | 0.1309  | 0.0969  | 0.302  | 0.370                 | 1.351 |
| 1/2                      | 18           | 0.049              | 0.1269  | 0.1309  | 0.1052  | 0.236  | 0.402                 | 1.244 |
| 1/2                      | 20           | 0.035              | 0.1452  | 0.1309  | 0.1126  | 0.174  | 0.430                 | 1.163 |
| 1/2                      | 22           | 0.028              | 0.1548  | 0.1309  | 0.1162  | 0.141  | 0.444                 | 1.126 |
| 5/8                      | 12           | 0.109              | 0.1301  | 0.1636  | 0.1066  | 0.602  | 0.407                 | 1.536 |
| 5/8                      | 13           | 0.095              | 0.1486  | 0.1636  | 0.1139  | 0.537  | 0.435                 | 1.437 |
| 5/8                      | 14           | 0.083              | 0.1655  | 0.1636  | 0.1202  | 0.479  | 0.459                 | 1.362 |
| 5/8                      | 15           | 0.072              | 0.1817  | 0.1636  | 0.1259  | 0.425  | 0.481                 | 1.299 |
| 5/8                      | 16           | 0.065              | 0.1924  | 0.1636  | 0.1296  | 0.388  | 0.49s                 | 1.263 |
| 5/8                      | 17           | 0.058              | 0.2035  | 0.1636  | 0.1333  | 0.350  | 0.509                 | 1.228 |
| 5/8                      | 18           | 0.049              | 0.2181  | 0.1636  | 0.1380  | 0.303  | 0.527                 | 1.186 |
| 5/8                      | 19           | 0.042              | 0.2298  | 0.1636  | 0.1416  | 0.262  | 0.541                 | 1.155 |
| 5/8                      | 20           | 0.035              | 0.2419  | 0.1636  | 0.1453  | 0.221  | 0.555                 | 1.136 |
| 3/4                      | 10           | 0.134              | 0.1825  | 0.1963  | 0.1262  | 0.884  | 0.482                 | 1.556 |
| 3/4                      | 11           | 0.120              | 0.2043  | 0.1963  | 0.1335  | 0.809  | 0.510                 | 1.471 |
| 3/4                      | 12           | 0.109              | 0.2223  | 0.1963  | 0.1393  | 0.748  | 0.532                 | 1.410 |
| 3/4                      | 13           | 0.095              | 0.2463  | 0.1963  | 0.1466  | 0.666  | 0.560                 | 1.339 |
| 3/4                      | 14           | 0.083              | 0.2679  | 0.1963  | 0.1529  | 0.592  | 0.584                 | 1.284 |
| 3/4                      | 15           | 0.072              | 0.2884  | 0.1963  | 0.1587  | 0.520  | 0.606                 | 1.238 |
| 3/4                      | 16           | 0.065              | 0.3019  | 0.1963  | 0.1623  | 0.476  | 0.620                 | 1.210 |
| 3/4                      | 17           | 0.058              | 0.3157  | 0.1963  | 0.1660  | 0.428  | 0.634                 | 1.183 |
| 3/4                      | 18           | 0.049              | 0.3339  | 0.1963  | 0.1707  | 0.367  | 0.652                 | 1.150 |
| 3/4                      | 20           | 0.035              | 0.3632  | 0.1963  | 0.1780  | 0.269  | 0.680                 | 1.103 |
| 7/8                      | 10           | 0.134              | 0.2892  | 0.2291  | 0.1589  | 1.061  | 0.607                 | 1.441 |
| 7/8                      | 11           | 0.120              | 0.3166  | 0.2291  | 0.1662  | 0.969  | 0.635                 | 1.378 |
| 7/8                      | 12           | 0.109              | 0.3390  | 0.2291  | 0.1720  | 0.891  | 0.657                 | 1.332 |
| 7/8                      | 13           | 0.095              | 0.3685  | 0.2291  | 0.1793  | 0.792  | 0.685                 | 1.277 |
| 7/8                      | 14           | 0.083              | 0.3948  | 0.2291  | 0.1856  | 0.704  | 0.709                 | 1.234 |
| 7/8                      | 16           | 0.065              | 0.4359  | 0.2291  | 0.1950  | 0.561  | 0.745                 | 1.174 |
| 7/8                      | 18           | 0.049              | 0.4742  | 0.2291  | 0.2034  | 0.432  | 0.777                 | 1.126 |
| 7/8                      | 20           | 0.035              | 0.5090  | 0.2291  | 0.2107  | 0.313  | 0.805                 | 1.087 |
| 1                        | 8            | 0.165              | 0.3526  | 0.2618  | 0.1754  | 1.462  | 0.670                 | 1.493 |
| 1                        | 10           | 0.134              | 0.4208  | 0.2618  | 0.1916  | 1.237  | 0.732                 | 1.366 |
| 1                        | 11           | 0.120              | 0.4536  | 0.2618  | 0.1990  | 1.129  | 0.760                 | 1.316 |
| 1                        | 12           | 0.109              | 0.4803  | 0.2618  | 0.2047  | 1.037  | 0.782                 | 1.279 |
| 1                        | 13           | 0.095              | 0.5153  | 0.2618  | 0.2121  | 0.918  | 0.810                 | 1.235 |
| 1                        | 14           | 0.083              | 0.5463  | 0.2618  | 0.2183  | 0.813  | 0.834                 | 1.199 |
| 1                        | 15           | 0.072              | 0.5755  | 0.2618  | 0.2241  | 0.714  | 0.856                 | 1.167 |
| 1                        | 16           | 0.065              | 0.5945  | 0.2618  | 0.2278  | 0.649  | 0.870                 | 1.119 |

Sumber: Sadic Kakac and Hongtan Liu, 2002

# LAMPIRAN IV: Tabel A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids

TABLE A.1 Continued

| Composition            | Melting Point (K) | Properties at 300 K            |                   |                |  |  | Properties at Various Temperatures (K) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|----------------|--|--|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                        |                   | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $c_p$<br>(J/kg·K) | $k$<br>(W/m·K) | $\alpha \cdot 10^6$<br>(m <sup>2</sup> /s) |  | 100                                    | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 | 1200 | 1500 | 2000 | 2500 |
| Gold                   | 1336              | 19300                          | 129               | 317            | 127  |  | 327                                    | 323  | 311  | 298  | 284  | 270  | 255  |      |      |      |
| Iridium                | 2720              | 22500                          | 130               | 147            | 50.3                                       |  | 109                                    | 124  | 131  | 135  | 140  | 145  | 155  |      |      |      |
|                        |                   |                                |                   |                |  |  | 172                                    | 153  | 144  | 138  | 132  | 126  | 120  | 111  |      |      |
| Iron                   | 1810              | 7870                           | 447               | 80.2           | 23.1                                       |  | 90                                     | 122  | 133  | 138  | 144  | 153  | 161  | 172  |      |      |
| Pure                   |                   |                                |                   |                |  |  | 134                                    | 94.0 | 69.5 | 54.7 | 43.3 | 32.8 | 28.3 | 32.1 |      |      |
| Armco                  |                   |                                |                   |                |  |  | 216                                    | 384  | 490  | 574  | 680  | 975  | 609  | 654  |      |      |
| (99.75% pure)          |                   | 7870                           | 447               | 72.7           | 20.7                                       |  | 95.6                                   | 80.6 | 65.7 | 53.1 | 42.2 | 32.3 | 28.7 | 31.4 |      |      |
|                        |                   |                                |                   |                |  |  | 215                                    | 384  | 490  | 574  | 680  | 975  | 609  | 654  |      |      |
| Carbon steels          |                   |                                |                   |                |  |  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Plain carbon           |                   | 7854                           | 434               | 60.5           | 17.7                                       |  |  |      | 56.7 | 48.0 | 39.2 | 30.0 |      |      |      |      |
| (Mn $\leq$ 1%,         |                   |                                |                   |                |  |  |  |      | 487  | 559  | 685  | 1169 |      |      |      |      |
| Si $\leq$ 0.1%)        |                   |                                |                   |                |  |  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| AISI 1010              |                   | 7832                           | 434               | 63.9           | 18.8                                       |  |  |      | 58.7 | 48.8 | 39.2 | 31.3 |      |      |      |      |
|                        |                   |                                |                   |                |  |  |  |      | 487  | 559  | 685  | 1168 |      |      |      |      |
| Carbon-silicon         |                   | 7817                           | 446               | 51.9           | 14.9                                       |  |  |      | 49.8 | 44.0 | 37.4 | 29.3 |      |      |      |      |
| (Mn $\leq$ 1%,         |                   |                                |                   |                |  |  |  |      | 501  | 582  | 699  | 971  |      |      |      |      |
| 0.1% < Si $\leq$ 0.6%) |                   |                                |                   |                |  |  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Carbon-manganese-      |                   |                                |                   |                |  |  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| silicon                |                   | 8131                           | 434               | 41.0           | 11.6                                       |  |  |      | 42.2 | 39.7 | 35.0 | 27.6 |      |      |      |      |
| (1% < Mn $\leq$ 1.65%, |                   |                                |                   |                |  |  |  |      | 487  | 559  | 685  | 1090 |      |      |      |      |
| 0.1% < Si $\leq$ 0.6%) |                   |                                |                   |                |  |  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Chromium (low) steels  |                   |                                |                   |                |  |  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1/2Cr-1/2Mo-Si         |                   | 7822                           | 444               | 37.7           | 10.9                                       |  |  |      | 38.2 | 36.7 | 33.3 | 26.9 |      |      |      |      |
| (0.18% C, 0.05% Cr,    |                   |                                |                   |                |  |  |  |      | 492  | 575  | 688  | 969  |      |      |      |      |
| 0.23% Mo, 0.6% Si)     |                   |                                |                   |                |  |  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1 Cr-1/2Mo             |                   | 7858                           | 442               | 42.3           | 12.2                                       |  |  |      | 42.0 | 39.1 | 34.5 | 27.4 |      |      |      |      |
| (0.16% C, 1% Cr,       |                   |                                |                   |                |  |  |  |      | 492  | 575  | 688  | 969  |      |      |      |      |
| 0.54% Mo, 0.39% Si)    |                   |                                |                   |                |  |  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1 Cr-V                 |                   | 7836                           | 443               | 48.9           | 14.1                                       |  |  |      | 46.8 | 42.1 | 36.3 | 28.2 |      |      |      |      |
| (0.2% C, 1.02% Cr,     |                   |                                |                   |                |  |  |  |      | 492  | 575  | 688  | 969  |      |      |      |      |
| 0.15% V)               |                   |                                |                   |                |  |  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Sumber: Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition

# LAMPIRAN V: Tabel A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water

TABLE A.6 Continued

| Temperature,<br>$T$<br>(K) | Pressure,<br>$p$ (bars) <sup>a</sup> | Specific<br>Volume<br>(m <sup>3</sup> /kg)<br>$v_f \cdot 10^3$ | Heat of<br>Vapor-<br>ization,<br>$h_{fg}$<br>(kJ/kg) | Specific<br>Heat<br>(kJ/kg · K)<br>$c_{p,f}$ | Viscosity<br>(N · s/m <sup>2</sup> )<br>$\mu_f \cdot 10^6$ | Thermal<br>Conductivity<br>(W/m · K)<br>$k_f \cdot 10^3$ | Prandtl<br>Number<br>$Pr_f$ | Surface<br>Tension,<br>$\sigma_f \cdot 10^6$<br>(N/m) | Expansion<br>Coeff.<br>$\beta_f \cdot 10^6$<br>(K <sup>-1</sup> ) | Temper-<br>ature,<br>$T$ (K) |      |                    |
|----------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|-----------------------------|---|---|------------------------------|------|--------------------|
| 440                        | 7.333                                | 1.110  | 2059   | 4.36   | 162  | 14.50  | 682                         | 31.7  | 1.04  | 1.12                         | 440  |                    |
| 450                        | 9.319                                | 1.123  | 2024   | 4.40   | 256  | 14.85  | 678                         | 33.1  | 0.99  | 1.14                         | 450  |                    |
| 460                        | 11.71                                | 1.137  | 1989   | 4.44   | 268  | 14.3   | 673                         | 34.6  | 0.95  | 1.17                         | 460  |                    |
| 470                        | 14.55                                | 1.152  | 1951   | 4.48   | 279  | 13.6   | 667                         | 36.3  | 0.92  | 1.20                         | 470  |                    |
| 480                        | 17.90                                | 1.167  | 1912   | 4.53   | 294  | 12.9   | 660                         | 38.1  | 0.89  | 1.23                         | 480  |                    |
| 490                        | 21.83                                | 1.184  | 1870   | 4.59   | 310  | 12.4   | 651                         | 40.1  | 0.87  | 1.25                         | 490  |                    |
| 500                        | 26.40                                | 1.203  | 1825   | 4.66   | 327  | 11.8   | 642                         | 42.3  | 0.86  | 1.28                         | 500  |                    |
| 510                        | 31.66                                | 1.222  | 1779   | 4.74   | 347  | 11.3   | 631                         | 44.7  | 0.85  | 1.31                         | 510  |                    |
| 520                        | 37.70                                | 1.244  | 1730   | 4.84   | 370  | 10.8   | 621                         | 47.5  | 0.84  | 1.35                         | 520  |                    |
| 530                        | 44.58                                | 1.268  | 1679   | 4.95   | 396  | 10.4   | 608                         | 50.6  | 0.85  | 1.39                         | 530  |                    |
| 540                        | 52.38                                | 1.294  | 1622   | 5.08   | 427  | 10.1   | 594                         | 54.0  | 0.86  | 1.43                         | 540  |                    |
| 550                        | 61.19                                | 1.323  | 1564   | 5.24   | 464  | 9.7  | 580                         | 58.3  | 0.87  | 1.47                         | 550  |                    |
| 560                        | 71.08                                | 1.355  | 1499   | 5.43   | 509  | 9.4  | 563                         | 63.7  | 0.90  | 1.52                         | 560  |                    |
| 570                        | 82.16                                | 1.392  | 1429   | 5.68   | 567  | 9.1  | 548                         | 76.7  | 0.94  | 1.59                         | 570  |                    |
| 580                        | 94.51                                | 1.433  | 1353   | 6.00   | 640  | 8.8  | 528                         | 76.7  | 0.99  | 1.68                         | 580  |                    |
| 590                        | 108.3                                | 1.482  | 1274   | 6.41   | 735  | 8.4  | 513                         | 84.1  | 1.05  | 1.84                         | 590  |                    |
| 600                        | 123.5                                | 1.541  | 1176   | 7.00   | 875  | 8.1  | 497                         | 92.9  | 1.14  | 2.15                         | 600  |                    |
| 610                        | 137.3                                | 1.612  | 1068   | 7.85   | 1111   | 7.7  | 467                         | 103   | 1.30  | 2.60                         | 610  |                    |
| 620                        | 159.1                                | 1.705  | 941  | 9.35   | 15.4   | 7.2  | 25.9                        | 444   | 1.14  | 1.52                         | 3.46 | 620                |
| 625                        | 169.1                                | 1.778  | 858  | 10.6   | 18.3   | 7.0  | 27.0                        | 430   | 1.21  | 1.65                         | 4.20 | 625                |
| 630                        | 179.7                                | 1.856  | 781  | 12.6   | 22.1   | 6.7  | 28.0                        | 412   | 1.30  | 2.0                          | 4.8  | 630                |
| 635                        | 190.9                                | 1.935  | 683  | 16.4   | 27.6   | 6.4  | 30.0                        | 392   | 1.41  | 2.7                          | 6.0  | 635                |
| 640                        | 202.7                                | 2.075  | 560  | 26   | 42   | 5.9  | 32.0                        | 367   | 1.55  | 4.2                          | 9.6  | 640                |
| 645                        | 215.2                                | 2.351  | 361  | 90   | —  | 5.4  | 37.0                        | 331   | 1.78  | 12                           | 26   | 645                |
| 647.3 <sup>b</sup>         | 221.2                                | 3.170  | 0.0032   | 0  | ∞  | 45   | 238                         | 238   | ∞   | ∞                            | 0.1  | 647.3 <sup>b</sup> |

<sup>a</sup>Adapted from Reference 22.

<sup>b</sup>1 bar = 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>.

<sup>c</sup>Critical temperature.

Sumber: Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition

LAMPIRAN VI: Moody Diagram

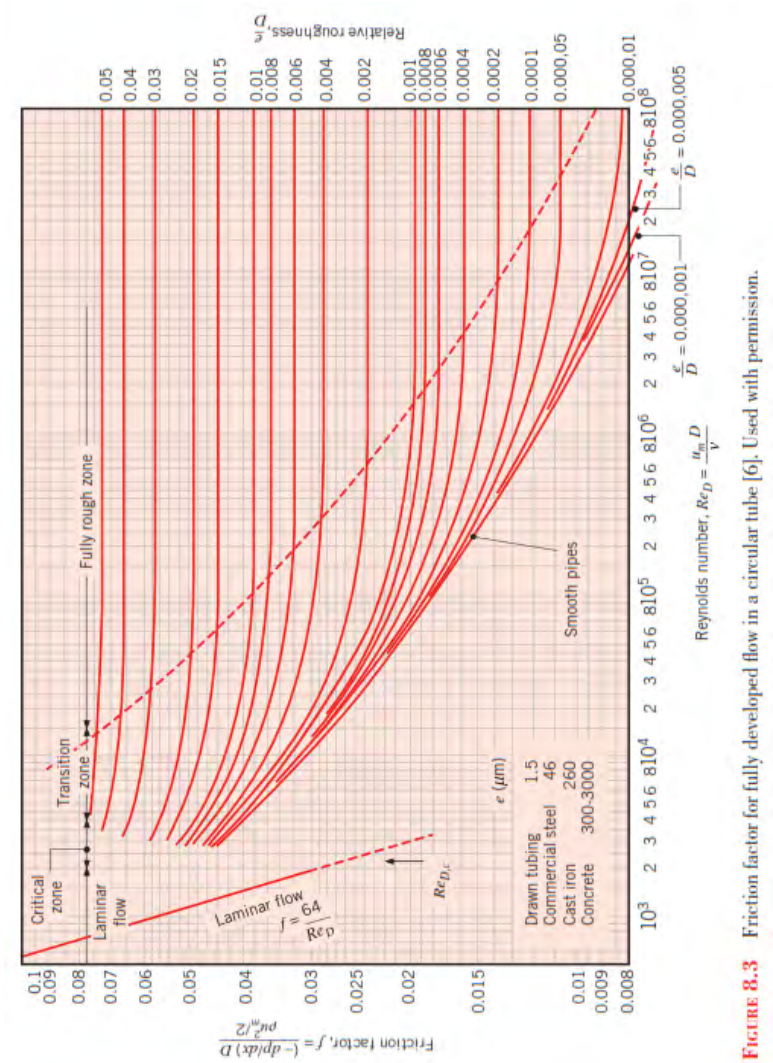


FIGURE 8.3 Friction factor for fully developed flow in a circular tube [6]. Used with permission.

Sumber: Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition

## LAMPIRAN VII: Tabel 8.1 *Roughness* Pipa

*Table 8.1*

**Roughness for Pipes of Common Engineering Materials**

| Pipe                             | Roughness, $e$ |             |
|----------------------------------|----------------|-------------|
|                                  | Feet           | Millimeters |
| Riveted steel                    | 0.003–0.03     | 0.9–9       |
| Concrete                         | 0.001–0.01     | 0.3–3       |
| Wood stave                       | 0.0006–0.003   | 0.2–0.9     |
| Cast iron                        | 0.00085        | 0.26        |
| Galvanized iron                  | 0.0005         | 0.15        |
| Asphalted cast iron              | 0.0004         | 0.12        |
| Commercial steel or wrought iron | 0.00015        | 0.046       |
| Drawn tubing                     | 0.000005       | 0.0015      |




Source: Data from Moody [8].

Sumber: Introduction to Fluid Mechanics Eighth Edition

## LAMPIRAN VIII: Tabel 8.2 Koefisien pipa untuk *minor losses*

*Table 8.2*

**Minor Loss Coefficients for Pipe Entrances**

| Entrance Type | Minor Loss Coefficient, $K^a$   |       |      |      |
|---------------|---|-------|------|------|
| Reentrant     |   | 0.78  |      |      |
| Square-edged  |  | 0.5   |      |      |
| Rounded       |  | $r/D$ | 0.02 | 0.06 |
|               |   | $K$   | 0.28 | 0.15 |
|               |   |       |      | 0.04 |

<sup>a</sup>Based on  $h_{L_e} = K(\bar{V}^2/2)$ , where  $\bar{V}$  is the mean velocity in the pipe.

Source: Data from Reference [11].



Sumber: Introduction to Fluid Mechanics Eighth Edition

LAMPIRAN IX: Calculation Sheet HPH 5

ECSDO 790204

CALCULATION SHEET  
DETERMINATION FOR FEEDWATER HEATERS

**AS BUILT DRAWING**  
TZ1003

|   |   |
|---|---|
|  | PERUSAHAAN UMUM LISTRIK NEGARA<br>JAKARTA INDONESIA |
| GRESIK STEAM POWER PLANT PROJECT<br>UNITS I AND II 2 × 100 MW                     |   |
|  | SUMITOMO CORPORATION<br>TOKYO JAPAN                 |
| CONTRACT NO. PJ208/PST/78   |   |

APPROVED BY K. Sakurai Aug 31 '79

CHECKED BY M. Shintani Aug 29 '79

PREPARED BY T. Gotoh AUG 28 '79

TOSHIBA CORPORATION

Rev. A NO



## [4] No. 5 HP feedwater heater

## 1. Design data (Heat balance M-T200901)

## Heating steam

|                            |                                  |
|----------------------------|----------------------------------|
| Quantity                   | Gs = 20650 kg/h                  |
| Pressure                   | Ps = 30.6 kg/cm <sup>2</sup> abs |
| Inlet enthalpy             | Hi = 762.3 kcal/kg               |
| Inlet temperature          | Ti = 382.0°C                     |
| Saturate temperature       | Ts = 233.9°C                     |
| Enthalpy of saturate steam | Hs = 669.31 kcal/kg              |

## Feedwater

|                    |                                      |
|--------------------|--------------------------------------|
| Quantity           | Gw = 388980 kg/h                     |
| Outlet temperature | TFO = 231.1°C                        |
| Inlet temperature  | TFI = 204.3°C                        |
| Temperature rise   | $\Delta t_{FW} = 26.8^\circ\text{C}$ |
| Outlet enthalpy    | HFO = 238.2 kcal/kg                  |
| Inlet enthalpy     | HF1 = 209.1 kcal/kg                  |
| Mean specific heat | Cp = 1.086 kcal/kg °C                |

## Flow out drain

|             |                     |
|-------------|---------------------|
| Quantity    | Gdo = 20650 kg/h    |
| Temperature | Tdo = 209.9°C       |
| Enthalpy    | Hdo = 214.4 kcal/kg |

## Tube

|                   |        |
|-------------------|--------|
| Material          | STB42  |
| Outside diameter  | 16 mm  |
| Nominal thickness | 1.8 mm |
| Mean thickness    | 2.0 mm |
| Number            | 531    |

Feedwater velocity in tubes at 15°C (based on mean thickness)

$$V = 1.799 \text{ m/sec}$$

## Total heat duty

$$\begin{aligned}
 D_{\text{TOTAL}} &= Gw (HFO - HF1) \\
 &= 388980 \times (238.2 - 209.1) = 11319318 \text{ kcal/h}
 \end{aligned}$$

## 2. Desuperheating zone (DSZ)

Pressure drop from steam inlet nozzle to DSZ inlet

$$\Delta P_1 = 0.131 \text{ kg/cm}^2$$

DSZ inlet steam pressure

$$P_s' = P_s - \Delta P_1$$

$$= 30.6 - 0.131 = 30.469 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$$

$$P_s' = 30.469 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$$

Temperature at

$$H_i = 762.3 \text{ kcal/kg}$$

$$T_i' = 381.9^\circ\text{C}$$

Saturate steam enthalpy at  $P_s'$ 

$$H_s' = 669.31 \text{ kcal/kg}$$

DSZ heat duty (Desuperheating rate  $\eta = 63.6\%$ )

$$D_{DSZ} = G_s (H_i - H_s') \eta$$

$$= 20650 \times (762.3 - 669.31) \times 0.636 = 1221275 \text{ kcal/kg}$$

DSZ outlet steam enthalpy

$$H_o = H_i - (H_i - H_s') \eta$$

$$= 762.3 - (762.3 - 669.31) \times 0.636 = 703.16 \text{ kcal/kg}$$

DSZ outlet temperature at  $P_s'$ ,  $H_o$ 

$$T_o = 280.55^\circ\text{C}$$

DSZ feedwater temperature rise

$$\Delta t_{DSZ} = \frac{D_{DSZ}}{C_p \cdot G_w} = \frac{1221275}{1.086 \times 388980} = 2.89^\circ\text{C}$$

DSZ inlet feedwater temperature

$$T_{Fi_{DSZ}} = T_{Fo} - \Delta t_{DSZ} = 231.1 - 2.89 = 228.21^\circ\text{C}$$



DSZ logarithmic mean temperature difference

$$\begin{array}{rcl}
 T_o = 280.55^\circ\text{C} & \text{steam} & T_i' = 381.9^\circ\text{C} \\
 & \text{feedwater} & T_{fo} = 231.1^\circ\text{C} \\
 T_{fi\text{DSZ}} = 228.21^\circ\text{C} & & 
 \end{array}$$

$$\theta_m = \frac{(T_i' - T_{fo}) - (T_o - T_{fi\text{DSZ}})}{\ln \frac{T_i' - T_{fo}}{T_o - T_{fi\text{DSZ}}}} = \frac{150.8 - 52.34}{\ln \frac{150.8}{52.34}} = 93.05^\circ\text{C}$$

$$\text{DSZ heat transfer coefficient} \quad K_{\text{DSZ}} = 582 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

DSZ required area

$$A_{\text{DSZ}} = \frac{D_{\text{DSZ}}}{K_{\text{DSZ}} \cdot \theta_m} = \frac{1221275}{582 \times 93.05} = 22.6 \text{ m}^2$$

$$\text{DSZ steam pressure drop} \quad \Delta P_2 = 0.224 \text{ kg/cm}^2$$

DSZ outlet steam pressure

$$P_o = P_s' - \Delta P_2 = 30.469 - 0.224 = 30.245 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Saturate temperature at } P_o \quad T_s' = 233.21^\circ\text{C}$$

$$\text{Enthalpy of saturate water at } P_o \quad H_{sd} = 240.13 \text{ kcal/kg}$$

## 3. Drain cooling zone (DCZ)

DCZ heat duty

$$\begin{aligned}
 D_{\text{DCZ}} &= G_{do} (H_{sd} - H_{do}) \\
 &= 20650 \times (240.13 - 214.4) = 531325 \text{ kcal/h}
 \end{aligned}$$

DCZ feedwater temperature rise

$$\Delta t_{\text{DCZ}} = \frac{D_{\text{DCZ}}}{C_p \cdot G_w} = \frac{531325}{1.086 \times 388980} = 1.26^\circ\text{C}$$

DCZ outlet feedwater temperature

$$TF_{oDCZ} = TF_i + \Delta T_{DCZ} = 204.3 + 1.26 = 205.56^\circ\text{C}$$

DCZ logarithmic mean temperature difference

$$\begin{array}{l} \text{drain} \nearrow Ts' = 233.21^\circ\text{C} \\ T_{do} = 209.9^\circ\text{C} \quad \text{feedwater} \nearrow TF_{oDCZ} = 205.56^\circ\text{C} \\ TF_i = 204.3^\circ\text{C} \end{array}$$

$$\theta_m = \frac{(Ts' - TF_{oDCZ}) - (T_{do} - TF_i)}{\ln \frac{Ts' - TF_{oDCZ}}{T_{do} - TF_i}} = \frac{27.65 - 5.6}{\ln \frac{27.65}{5.6}} = 13.81^\circ\text{C}$$

DCZ heat transfer coefficient

$$K_{DCZ} = 1772 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

DCZ required area

$$A_{DCZ} = \frac{D_{DCZ}}{K_{DCZ} \cdot \theta_m} = \frac{531325}{1772 \times 13.81} = 21.7 \text{ m}^2$$

## 4. Condensing zone (CZ)

CZ heat duty

$$\begin{aligned} D_{CZ} &= D_{TOTAL} - D_{DSZ} - D_{DCZ} \\ &= 11319318 - 1221275 - 531325 \\ &= 9566718 \text{ kcal/h} \end{aligned}$$

CZ logarithmic mean temperature difference

$$\begin{array}{l} Ts' = 233.21^\circ\text{C} \\ \text{steam} \\ \text{feedwater} \nearrow TF_{iDSZ} = 228.21^\circ\text{C} \\ TF_{oDCZ} = 205.56^\circ\text{C} \end{array}$$

$$\theta_m = \frac{(Ts' - TF_{oDCZ}) - (Ts' - TF_{iDSZ})}{\ln \frac{Ts' - TF_{oDCZ}}{Ts' - TF_{iDSZ}}} = \frac{27.65 - 5}{\ln \frac{27.65}{5}} = 13.24^\circ\text{C}$$

CZ heat transfer coefficient

$$K_{CZ} = 3571 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

CZ required area

$$A_{DCZ} = \frac{D_{CZ}}{K_{CZ} \cdot \theta_m} = \frac{9566718}{3571 \times 13.24} = 202.3 \text{ m}^2$$

## 5. Total area

|                       | Required area        | Actual area          |
|-----------------------|----------------------|----------------------|
| - Desuperheating zone | 22.6 m <sup>2</sup>  | 22.7 m <sup>2</sup>  |
| Drain cooling zone    | 21.7 m <sup>2</sup>  | 24.0 m <sup>2</sup>  |
| Condensing zone       | 202.3 m <sup>2</sup> | 209.9 m <sup>2</sup> |
| Ineffectual area      | -                    | 3.4 m <sup>2</sup>   |
| Total                 | 246.6 m <sup>2</sup> | 260.0 m <sup>2</sup> |

## LAMPIRAN X: Design Data HPH 5

### 1. DESIGN DATA

| Heaters   |                                | No.1 LP<br>Heater | No.2 LP<br>Heater | No.4 HP<br>Heater | No.5 HP<br>Heater |
|---|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Items   |                                |                   |                   |                   |                   |
| Type  | Horizontal closed tubular type |                   |                   |                   |                   |
| Number per unit                                 |                                | 1                 | 1                 | 1                 | 1                 |
| Total heating surface (m <sup>2</sup> )         |                                | 370               | 230               | 330               | 260               |
| Feed water flow (kg/h)                          |                                | 322500            | 322500            | 388980            | 388980            |
| Feed water inlet temp. (°C)                     |                                | 44.3              | 92.1              | 168.5             | 204.3             |
| Feed water outlet temp. (°C)                    |                                | 92.1              | 130.9             | 204.3             | 231.1             |
| Heating steam flow (kg/h)                       |                                | 25610             | 22870             | 24810             | 20650             |
| Heating steam press. (kg/cm <sup>2</sup> abs)   |                                | 0.859             | 3.07              | 18.36             | 30.6              |
| Heating steam temp. (°C)                        |                                | 94.9              | 133.7             | 316.19            | 381.9             |
| Drain flow (kg/h)                               |                                | 48480             | 22870             | 45460             | 20650             |
| Drain outlet temp. (°C)                         |                                | 49.9              | 97.7              | 174.1             | 209.9             |
| Terminal temperature difference T.T.D. (°C)     |                                | 2.8               | 2.8               | 2.8               | 2.8               |
| Drain cooler approach D.C.A. (°C)               |                                | 5.6               | 5.6               | 5.6               | 5.6               |
| Feed water velocity (m/sec.)                    |                                | 1.597             | 1.993             | 1.799             | 1.799             |
| Number of tube passes                           |                                | 2                 | 2                 | 2                 | 2                 |
| Feed water pressure drop (kg/cm <sup>2</sup> )  |                                | 0.524             | 0.592             | 0.461             | 0.381             |
| Design press.<br>(kg/cm <sup>2</sup> g)         | Shell side                     | 0.2               | 3.1               | 24                | 41                |
|   | Tube side                      | 15                | 15                | 125               | 125               |
| Design temp.<br>(°C)                            | Shell side                     | 105               | 144               | 224               | 253               |
|   | Steam inlet sec.               | 105               | 153               | 342               | 410               |
|   | Tube side                      | 105               | 144               | 224               | 253               |
| Hydraulic test press.<br>(kg/cm <sup>2</sup> g) | Shell side                     | 2                 | 4.7               | 36                | 61.5              |
|   | Tube side                      | 22.5              | 22.5              | 187.5             | 187.5             |

Sumber: Instruction Manual

## LAMPIRAN XI: Construction Data HPH 5

### 2. CONSTRUCTION DATA

| Heaters                                   |                   | No. 1 LP<br>Heater | No. 2 LP<br>Heater | No. 4 HP<br>Heater                 | No. 5 HP<br>Heater                 |
|---|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Tubes                                     | Quantity (U-tube) | 392                | 314                | 531                                | 531                                |
|   | Outer dia. (mm)   | 16                 | 16                 | 16                                 | 16                                 |
|   | Thickness (mm)    | 1.25               | 1.25               | 1.8                                | 1.8                                |
|   | Eff. length (mm)  | 18778              | 14573              | 12364                              | 9741                               |
| Method of tube fixing                     |                   | Expanding          | Expanding          | Welding after<br>Expanding         | Welding after<br>Expanding         |
| Overall heater length (mm)                |                   | 11146              | 8903               | 7400                               | 6090                               |
| Shell inner dia. (mm)                     |                   | 1000               | 900                | 1050                               | 1000                               |
| Channel inner dia. (mm)                   |                   | 1000               | 900                | 980                                | 980                                |
| Thickness<br>(mm)                         | Shell plate       | 9                  | 9                  | 16                                 | 22                                 |
|   | Channel plate     | 16                 | 12                 | 90                                 | 90                                 |
|   | Tube sheet        | 75                 | 70                 | 160                                | 160                                |
| Feed water flow distri-<br>bution devices |                   |                    |                    | Insert pipe<br>Bell mouth<br>plate | insert pipe<br>Bell mouth<br>plate |

Sumber: Instruction Manual

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Lumajang, Jawa Timur pada tanggal 13 Juni 1996 dari pasangan Bapak Eko Agus Widjanarko, S.H., M.M. dan Ibu Rukmi Parwati. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Pendidikan formal yang pernah ditempuh yaitu TK Dharma Wanita Lumajang, SDN Ditotrutan 01 Lumajang, SMPN 02 Lumajang, dan SMA PGRI 01 Lumajang.

Pada tahun 2014, penulis diterima sebagai mahasiswa di Program Studi Diploma III, Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dengan NRP 2114030047. Penulis mengambil bidang keahlian Konversi Energi dan mengambil Tugas Akhir di bidang yang sama dengan tema Perpindahan Panas.

Selama duduk di bangku kuliah, penulis cukup aktif mengikuti beberapa pelatihan seperti PKTI, LKMM Pra TD, LKMM TD, PJTD, dan PMB. Selain itu penulis juga mengikuti kepanitian antara lain OC (Organizing Committee) acara pada Gerigi 2015 dan OC acara LKMM Pra TD 2015.

Untuk mengetahui informasi lebih lanjut tentang penulis, dapat melalui e-mail: [nadia21wijanarko@gmail.com](mailto:nadia21wijanarko@gmail.com)